Acerca de este libro

Esta es una copia digital de un libro que, durante generaciones, se ha conservado en las estanterías de una biblioteca, hasta que Google ha decidido escanearlo como parte de un proyecto que pretende que sea posible descubrir en línea libros de todo el mundo.

Ha sobrevivido tantos años como para que los derechos de autor hayan expirado y el libro pase a ser de dominio público. El que un libro sea de dominio público significa que nunca ha estado protegido por derechos de autor, o bien que el período legal de estos derechos ya ha expirado. Es posible que una misma obra sea de dominio público en unos países y, sin embargo, no lo sea en otros. Los libros de dominio público son nuestras puertas hacia el pasado, suponen un patrimonio histórico, cultural y de conocimientos que, a menudo, resulta difícil de descubrir.

Todas las anotaciones, marcas y otras señales en los márgenes que estén presentes en el volumen original aparecerán también en este archivo como testimonio del largo viaje que el libro ha recorrido desde el editor hasta la biblioteca y, finalmente, hasta usted.

Normas de uso

Google se enorgullece de poder colaborar con distintas bibliotecas para digitalizar los materiales de dominio público a fin de hacerlos accesibles a todo el mundo. Los libros de dominio público son patrimonio de todos, nosotros somos sus humildes guardianes. No obstante, se trata de un trabajo caro. Por este motivo, y para poder ofrecer este recurso, hemos tomado medidas para evitar que se produzca un abuso por parte de terceros con fines comerciales, y hemos incluido restricciones técnicas sobre las solicitudes automatizadas.

Asimismo, le pedimos que:

+ *Haga un uso exclusivamente no comercial de estos archivos* Hemos diseñado la Búsqueda de libros de Google para el uso de particulares; como tal, le pedimos que utilice estos archivos con fines personales, y no comerciales.

+ *No envíe solicitudes automatizadas* Por favor, no envíe solicitudes automatizadas de ningún tipo al sistema de Google. Si está llevando a cabo una investigación sobre traducción automática, reconocimiento óptico de caracteres u otros campos para los que resulte útil disfrutar de acceso a una gran cantidad de texto, por favor, envíenos un mensaje. Fomentamos el uso de materiales de dominio público con estos propósitos y seguro que podremos ayudarle.

+ *Conserve la atribución* La filigrana de Google que verá en todos los archivos es fundamental para informar a los usuarios sobre este proyecto y ayudarles a encontrar materiales adicionales en la Búsqueda de libros de Google. Por favor, no la elimine.

+ *Manténgase siempre dentro de la legalidad* Sea cual sea el uso que haga de estos materiales, recuerde que es responsable de asegurarse de que todo lo que hace es legal. No dé por sentado que, por el hecho de que una obra se considere de dominio público para los usuarios de los Estados Unidos, lo será también para los usuarios de otros países. La legislación sobre derechos de autor varía de un país a otro, y no podemos facilitar información sobre si está permitido un uso específico de algún libro. Por favor, no suponga que la aparición de un libro en nuestro programa significa que se puede utilizar de igual manera en todo el mundo. La responsabilidad ante la infracción de los derechos de autor puede ser muy grave.

Acerca de la Búsqueda de libros de Google

El objetivo de Google consiste en organizar información procedente de todo el mundo y hacerla accesible y útil de forma universal. El programa de Búsqueda de libros de Google ayuda a los lectores a descubrir los libros de todo el mundo a la vez que ayuda a autores y editores a llegar a nuevas audiencias. Podrá realizar búsquedas en el texto completo de este libro en la web, en la página `http://books.google.com`

Informazioni su questo libro

Si tratta della copia digitale di un libro che per generazioni è stato conservata negli scaffali di una biblioteca prima di essere digitalizzato da Google nell'ambito del progetto volto a rendere disponibili online i libri di tutto il mondo.

Ha sopravvissuto abbastanza per non essere più protetto dai diritti di copyright e diventare di pubblico dominio. Un libro di pubblico dominio è un libro che non è mai stato protetto dal copyright o i cui termini legali di copyright sono scaduti. La classificazione di un libro come di pubblico dominio può variare da paese a paese. I libri di pubblico dominio sono l'anello di congiunzione con il passato, rappresentano un patrimonio storico, culturale e di conoscenza spesso difficile da scoprire.

Commenti, note e altre annotazioni a margine presenti nel volume originale compariranno in questo file, come testimonianza del lungo viaggio percorso dal libro, dall'editore originale alla biblioteca, per giungere fino a te.

Linee guide per l'utilizzo

Google è orgoglioso di essere il partner delle biblioteche per digitalizzare i materiali di pubblico dominio e renderli universalmente disponibili. I libri di pubblico dominio appartengono al pubblico e noi ne siamo solamente i custodi. Tuttavia questo lavoro è oneroso, pertanto, per poter continuare ad offrire questo servizio abbiamo preso alcune iniziative per impedire l'utilizzo illecito da parte di soggetti commerciali, compresa l'imposizione di restrizioni sull'invio di query automatizzate.

Inoltre ti chiediamo di:

+ *Non fare un uso commerciale di questi file* Abbiamo concepito Google Ricerca Libri per l'uso da parte dei singoli utenti privati e ti chiediamo di utilizzare questi file per uso personale e non a fini commerciali.

+ *Non inviare query automatizzate* Non inviare a Google query automatizzate di alcun tipo. Se stai effettuando delle ricerche nel campo della traduzione automatica, del riconoscimento ottico dei caratteri (OCR) o in altri campi dove necessiti di utilizzare grandi quantità di testo, ti invitiamo a contattarci. Incoraggiamo l'uso dei materiali di pubblico dominio per questi scopi e potremmo esserti di aiuto.

+ *Conserva la filigrana* La "filigrana" (watermark) di Google che compare in ciascun file è essenziale per informare gli utenti su questo progetto e aiutarli a trovare materiali aggiuntivi tramite Google Ricerca Libri. Non rimuoverla.

+ *Fanne un uso legale* Indipendentemente dall'utilizzo che ne farai, ricordati che è tua responsabilità accertati di farne un uso legale. Non dare per scontato che, poiché un libro è di pubblico dominio per gli utenti degli Stati Uniti, sia di pubblico dominio anche per gli utenti di altri paesi. I criteri che stabiliscono se un libro è protetto da copyright variano da Paese a Paese e non possiamo offrire indicazioni se un determinato uso del libro è consentito. Non dare per scontato che poiché un libro compare in Google Ricerca Libri ciò significhi che può essere utilizzato in qualsiasi modo e in qualsiasi Paese del mondo. Le sanzioni per le violazioni del copyright possono essere molto severe.

Informazioni su Google Ricerca Libri

La missione di Google è organizzare le informazioni a livello mondiale e renderle universalmente accessibili e fruibili. Google Ricerca Libri aiuta i lettori a scoprire i libri di tutto il mondo e consente ad autori ed editori di raggiungere un pubblico più ampio. Puoi effettuare una ricerca sul Web nell'intero testo di questo libro da `http://books.google.com`

fQC
518
.E5

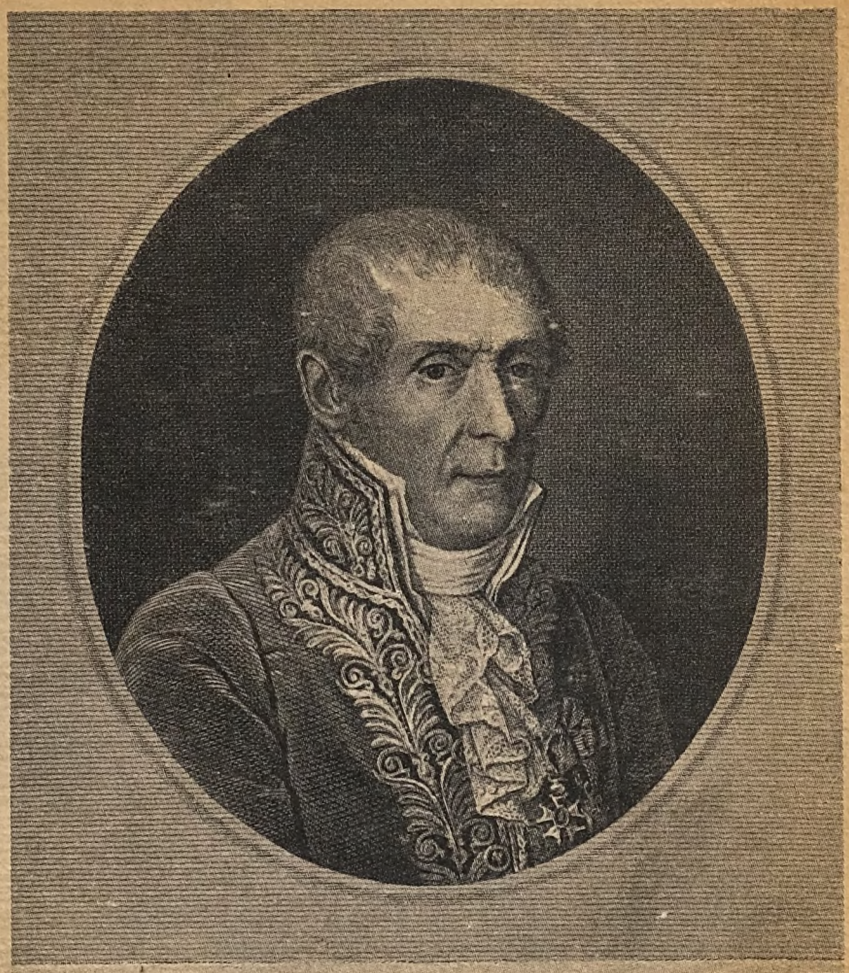
NEL I° CENTENARIO DELLA MORTE DI

ALESSANDRO VOLTA

1827 - 1927

FASCICOLO SPECIALE DE

L'ENERGIA ELETTRICA



ALEXANDER . VOLTA .
IN . RE . ELECTRICA . PRINCEPS .
VIM . RAIAE . TORPEDINIS . MEDITATVS .
NATVRAE . INTERPRES . ET . AEMVLVS

PVBBLICATO SOTTO GLI AVSPICI DELLA
VNIONE NAZIONALE INDVSTRIE ELETTRICHE (VNIEL)
E LA DIREZIONE DEL PROF. O.M. CORBINO SENATORE DEL REGNO

STATE UNIVERSITY OF IOWA LIBRARY
Digitized by Google

PHYSICS

State
University
of Iowa
Libraries

fQC518
E5

Digitized by Google

3 1858 026 078 596
phys,osiz Nel I. centenario della morte di Al
essandro Volta 1827-1927./Energia Elettrica.
fQC 518 .E5 /*c.1

Date Due

21 Mar '47			

Library Bureau Cat. no. 1137

Digitized by Google

Digitized by Google

NEL I° CENTENARIO DELLA MORTE DI

ALESSANDRO VOLTA

1827 – 1927

Digitized by Google

DI QUESTO VOLUME NE FURONO STAMPATI
ANCHE 200 ESEMPLARI
IN CARTA SPECIALE E NUMERATI

Digitized by Google

NEL I° CENTENARIO DELLA MORTE DI

ALESSANDRO VOLTA

1827 - 1927

11/14-3

FASCICOLO SPECIALE DE

L'ENERGIA ELETTRICA

PVBBLICATO SOTTO GLI AVSPICI DELLA
VNIONE NAZIONALE INDVSTRIE ELETTRICHE (VNIEL)
E LA DIREZIONE DEL PROF. O.M. CORBINO SENATORE DEL REGNO

Digitized by Google

PROPRIETÀ LETTERARIA RISERVATA
I DIRITTI DI RIPRODUZIONE E DI TRADUZIONE SONO RISERVATI PER TUTTI I PAESI
COMPRESI LA SVEZIA, LA NORVEGIA E L'OLANDA
COPYRIGHT BY UNIONE NAZIONALE INDUSTRIE ELETTRICHE (UNIEL) ROMA

Arti Grafiche E. Calamandrei & C. - Milano, Via Hayez, 9

Digitized by Google

PHYSICS
fQC518
E5

PREFAZIONE

Nel maggio dello scorso anno l'On. Ing. Giacinto Motta, fondatore e Presidente della Associazione Nazionale Industrie Elettriche (*ANIEL*) *ebbe l'idea di pubblicare un numero speciale del giornale dell'Associazione,* L'Energia Elettrica, *dedicandolo ad Alessandro Volta, come omaggio alla memoria del Grande Italiano nella ricorrenza del centenario della sua morte. In quel numero speciale dovevano essere raccolte varie monografie illustrative dei capitoli principali della Elettrologia, fissandone lo stato di sviluppo raggiunto. Per realizzare l'interessante progetto, destinato ad apprestare, tra le manifestazioni che si svolgeranno nell'annata, un'opera di carattere più duraturo, l'On. Motta volle affidare a me il lusinghiero incarico di scegliere i temi e gli Autori più adatti a trattarli, e di coordinare il lavoro. Il volume che per suo invito io presento oggi al pubblico degli studiosi, credo, risponda bene al proposito del suo ideatore. Fissate alcune direttive di carattere generalissimo, lasciata ai vari Autori piena libertà nello svolgimento dei temi assegnati; si è così, forse, perduto alquanto nella omogeneità della trattazione; ma in compenso l'opera ha guadagnato una maggiore vivacità, che ne facilita la lettura; e inoltre il temperamento personale dei vari Autori si è potuto estrinsecare con più fresca spontaneità.*

Sono pertanto ben soddisfatto del lavoro compiuto dai miei egregi collaboratori; e ne interpreto il pensiero ringraziando in loro nome l'illustre promotore della simpatica iniziativa e l'Associazione UNIEL che, succedendo alla ANIEL, ne ha confermato con fervido consenso l'attuazione.

L'edizione è stata curata con la nota solerzia e abilità dal Chiar.mo Ing. Carlo Bonomi, al quale voglio pubblicamente esprimere la mia cordiale soddisfazione.

Devo infine spiegare ai lettori, i quali ebbero preliminare notizia del contenuto della pubblicazione da una Nota de L'Energia Elettrica, *che, con nostro vivo dispiacere, non poterono inviare gli articoli sui temi loro assegnati il Prof. A. Garbasso (Teoria elettromagnetica della luce) e il Prof. G. Di Pirro (Telegrafia e Telefonia) perchè impediti dai gravi doveri del loro ufficio.*

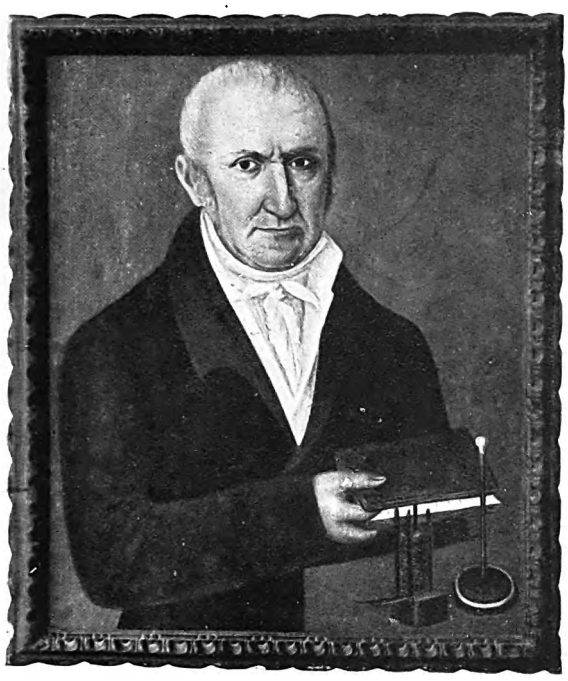
O. M. CORBINO.

Roma, 20 febbraio 1927.

281013

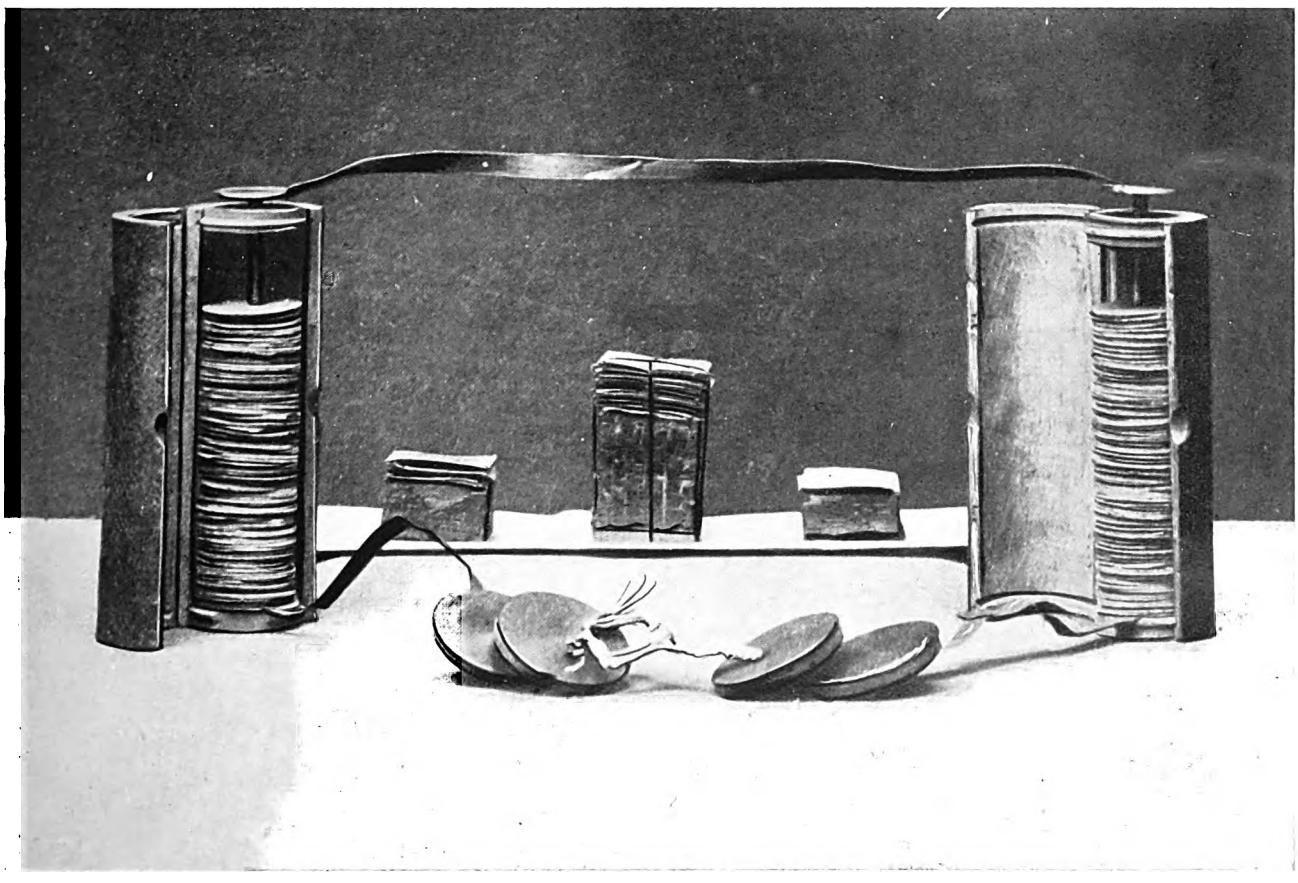
Digitized by Google

Digitized by Google



Ritratto ad olio del Volta vecchio
(famiglia Volta).

Le medaglie conferite al Volta
dall'Istituto di Francia
e dalla Soc. Reale di Londra.



Cimeli voltiani, già esistenti all'Istituto Lombardo (Milano).

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. LUIGI VOLTA
R. UNIVERSITÀ DI TORINO

L'OPERA SCIENTIFICA DI ALESSANDRO VOLTA

Digitized by Google

Digitized by Google

L'accolta di scritti con cui insigni specialisti fisici e tecnici illustrano in questo fascicolo le teorie e le applicazioni nate dall'elettromozione costituisce la migliore e più convincente esaltazione del Volta; è una degna corona intessuta e cinta da discepoli e successori al Maestro. Non sembrerà tuttavia inopportuno che uno almeno risalga all'origine, parli del Maestro e tenti di rievocarne l'opera e la figura scientifica, inquadrata nell'ambiente della sua attività. Sembrerà piuttosto ardimento eccessivo che ciò sia fatto da chi non è specialista di questi studi; l'ardimento è infatti giustificato in parte e soltanto dalla dimestichezza coi documenti editi e inediti di questa attività poderosa, dimestichezza fatta collaborando all'Edizione nazionale voltiana, e da inestinguibili tradizioni famigliari.

E poichè la gloria del Volta quale inventore della pila lascia troppo in ombra le altre sue conquiste e la storia della teoria della pila è troppo nota ed è storia che continua, come può dire altri assai più competente di me, non parrà sproporzionato e ingiusto ch'io mi soffermi sopratutto negli altri campi degli studi voltiani.

Dall'edizione nazionale risulterà compresa fra il 1763 e il 1823 l'attività scientifica del Volta: del 1765 è la lettera, inedita, di lui ventenne al Padre Beccaria (1716-81) professore nell'Università di Torino; del 1823 è la lettera, edita, di lui quasi ottantenne al conte Marzari (1779-1836) sui, anzi, contro i paragrandine. Lo scrittore giovinetto chiude la prima di esse, d'argomento elettrico, affermando appunto il *suo genio* (voleva, elegantemente, dire inclinazione) *per l'elettricità*, frase che possiamo intendere ora alla lettera, come una profezia. Non era questa la sua prima epistola al professore illustre ed è noto che già diciottenne egli era in corrispondenza col francese Nollet (1700-70).

Questa lunga carriera, variamente intensa di lavoro, può dividersi in cinque periodi caratteristici, se non proprio distinti: il primo, giovanile, di libero studioso, avanti la sua nomina a professore e che arriva all'invenzione dell'elettroforo (1775); il secondo che va sino al condensatore (1782) e comprende i brevi anni d'insegnamento secondario a Como e i primi d'insegnamento universitario a Pavia; il terzo fra il condensatore e le prime esperienze galvaniche (1792); il quarto, della polemica famosa, che si chiude coll'invenzione della pila (1799-800); il quinto e ultimo posteriore alla pila.

Le tappe sono, come si vede, contrassegnate da conquiste fatte nel campo elettrico, il suo campo prediletto e trionfale; pur tuttavia è giusto mettere in evidenza — come risulterà luminosamente dall'edizione nazionale — ed è opportuno insistervi in quest'anno del centenario, perchè sopratutto all'estero si mostra d'ignorarlo, che il Volta ha lasciato orme luminose nella termologia dei gas e dei vapori, nell'aerologia, nella meteorologia, specialmente elettrica.

E anche nel campo dell'elettricità è giusto mettere in piena evidenza che, se egli è sopratutto il padre dell'elettrodinamica, le sue ricerche elettrostatiche, perseguite con unità e genialità di metodo pari a quelle che lo condussero alla pila, si svolsero, con ancor più vasto respiro, per un periodo assai più lungo, dagli anni giovanissimi delle lettere al Nollet sino alla vecchiezza, dopo la pila; periodo costellato di scoperte, se non grandiose nelle conseguenze, come quella dell'elettromozione, capitali alcune dal lato teorico. Al quale, si deve dire, essenzialmente dava importanza il Volta, come si legge alla fine dell'aggiunta alla lettera al Priestley (1733-804) del Giugno 1775 sulla scoperta dell'elettroforo (pubblicata negli *Opuscoli Scelti* dell'Amoretti), sebbene egli si sia compiaciuto nella giovinezza delle piccole meraviglie della pistola e della lucerna elettrica, degli eleganti strumenti tascabili e più tardi si sia vivamente interessato alle applicazioni fisiche e chimiche e anche terapeutiche della pila.

Quella che cronologicamente è la sua prima scoperta, non è elettrica; è infatti la scoperta del metano (1774) o aria delle paludi, come la chiamò il Volta, press'a poco contemporanea a quelle dell'ossigeno (aria deflogisticata) e dell'idrogeno (aria infiammabile o metallica). Dominava ancora la teoria flogistica dello Stahl (1718-90): il calorico era generalmente ritenuto un corpo chimicamente combinabile, salvo che da una valorosa scuola inglese; periodo confuso di preparazione adunque, precedente al nascere della cosidetta teoria dualistica del Lavoisier (1743-94). Non è meraviglia quindi se il Volta errò nella formulazione chimica del nuovo gas, sebbene gli si debba riconoscere il merito d'essersi tosto accostato alla scuola inglese or ora citata e più tardi alle geniali idee del Lavoisier.

Digitized by Google

La scoperta del metano generò l'invenzione della pistola elettrica e questa quella dell'eudiometro, che andò poi successivamente nelle sue mani perfezionandosi in un compiuto strumento d'aerometria.

Gli studi aerologici voltiani invadono anche quello che abbiamo chiamato il secondo periodo della sua attività e li vedremo raccolti nel sesto volume dell'edizione nazionale. Il Volta aveva infatti incominciato dallo studiare l'efficacia della scintilla elettrica a provocare la combinazione del metano, come pure dell'idrogeno, coll'aria comune e poi a cercare le più convenienti proporzioni volumetriche dei componenti per la combinazione stessa. Più tardi egli instituì le analoghe misure per la combinazione dell'idrogeno (aria metallica) coll'ossigeno (aria deflogisticata), sfiorando, senza raggiungere, due anni prima del Cavendish (1731-1810), la sintesi dell'acqua.

Nei riguardi adunque del metano, il fisico aveva avuto nel Volta il sopravvento sul chimico e la prediletta elettricità gli aveva fornito efficaci mezzi di esperimento.

Le ricerche elettriche, le quali l'occuparono per oltre mezzo secolo, presentano il carattere di una unità e continuità meravigliosa di pensiero. Se cerchiamo un nome da cui incominciare la storia voltiana, se cerchiamo un maestro di elettricità al Volta, troviamo un grandissimo nome e un insigne maestro: il Franklin (1706-90).

Nell'incertezza delle cognizioni elettrostatiche, mentre l'elettrico è creduto, come il calorico, un elemento semplice chimicamente combinabile, di cui il Nollet cercò il peso, mentre ancora furoreggiano gli esperimenti mirabolanti, ai quali non si sottrasse il Franklin stesso, il Volta inizia con severità e pazienza i suoi studi e presceglie la teoria unitaria (fluido unico) del Franklin a quella dualistica (due fluidi) del Symmer (✠ 1763) e osa combattere la famosa teoria dell'elettricità vindice del padre Beccaria nella sua prima memoria stampata: *De vi attractiva ignis electrici* ecc. del 1769, sul giuoco dell'elettricità nei coibenti armati, alla quale memoria segue ben presto, nel 1771 un breve compendio, pure latino, sulle proprietà degli idioelettrici (coibenti). Nel *De vi attractiva* il Volta, pur restando nell'orbita della teoria frankliniana, espone de' suoi modelli meditati e compiuti sia dello sbilancio elettrico per istrofinio, sia della distribuzione elettrica per induzione. Il prof. Massardi, valentissimo curatore dell'edizione nazionale, ha dimostrato, in una sua lucida nota all'Istituto Lombardo, come in questa operetta giovenile siano le radici delle successive teorie e delle future scoperte, donde l'unità logica del pensiero voltiano testè affermata.

Spiegando lo sbilancio elettrico cogli spostamenti delle particelle materiali provocati dallo strofinio (essendovi attrazione fra materia e fluido elettrico secondo il Franklin e secondo il Volta), egli prevede sviluppo di elettricità dalle effervescenze, come poi lo dimostrerà nell'evaporazione (1782) e più tardi (1787-90) nelle cascate, e dal raspamento del ghiaccio, come infine cercherà l'origine dell'elettricità atmosferica nei mutamenti della distribuzione di masse tra la superficie terrestre e l'atmosfera. E concependo il contatto come caso limite dello strofinio, spunta timida e ancor informe l'ipotesi della generazione di elettricità per contatto, ipotesi esplicitamente espressa in una nota autografa forse anteriore al 1782, cioè al condensatore.

Così nel modello del fenomeno induttivo si ravvisano – derivanti dall'esatta interpretazione del giuoco dei dielettrici — secondo il Massardi, anche il germe del concetto di tensione elettrica, enunciato poi nettamente in una lettera al Saussure (1740-99) del 1778 e, sovratutto, il germe delle future scoperte dell'elettroforo e del condensatore.

Il primo periodo voltiano è adunque caratterizzato dal *De vi attractiva* ed è mirabile che nella sua prima e così feconda pubblicazione il Volta ponga tanto solidamente le premesse teoriche di quasi tutta la sua attività nel campo elettrico.

L'elettroforo è del 1775; gliene fu contestata la priorità, citando un apparato del Wilcke (1732-96), pel principio e per lo scopo (dimostrazione della teoria dualistica del Symmer combattuta dal Volta), lontano dall'elettroforo, seppure analogo per costruzione, come il Volta stesso, che l'ignorava, ebbe a riconoscere.

Del secondo periodo voltiano (1777) è la famosa lettera al padre Barletti (✠ 1800), in cui gli annuncia l'invenzione della pistola e parla della possibilità di farla sparare a Milano colla scarica di una bottiglia di Leyda a Como, attraverso un circuito unifilare, interrotto appunto dalla pistola e continuato poi dal naviglio, congiungente Milano al lago di Como. Molti videro in questo brano l'intuizione del telegrafo; ma qui il Volta pensava piuttosto alla trasmissibilità per conduzione dell'energia elettrica ed è giusto ricordare che esperienze analoghe di trasmissione di una scarica elettrica per mezzo di condutture metalliche ed acquee, sebbene a distanze minori, erano state già, non solo concepite, ma compiute, per citare col Govi solo qualcuno, dal Von Guericke (1602-86), dal Watson (1715-87), dal Le Monniere (1717-99) medico di Luigi XVI, dal Franklin.

Il secondo periodo voltiano oltre e più che per gli studi aerologici già citati è notevole per l'evolversi sicuro delle vedute teoriche adombrate nel *De vi attractiva;* ne' suoi scritti sulla capacità de' conduttori coniugati (1778) e sulle atmosfere elettriche la teoria dell'induzione elettrostatica o, come il Volta diceva, dell'*attuazione*, è sviscerata e perfezionata e i concetti di capacità, di tensione e di quantità di elettricità balzano nitidi e definitivi dalle discussioni intorno alle innumerevoli sue esperienze e misure, colle quali egli fonda l'elettrometria e arriva al condensatore.

Il prof. Massardi ha mostrato, in altra sua nota all'Istituto Lombardo, come in alcuni manoscritti inediti sulle atmosfere elettriche, contenenti lunghe serie di moltiplicazioni a catena e, caso più unico che raro, due formole, si possano senz'altro rilevare risultati o ricavare facilmente formole concordanti con quelle della fisica matematica, nella risoluzione del problema generale dell'elettrostatica. È questa

Digitized by Google

una delle più interessanti constatazioni a cui ha condotto lo studio dei manoscritti del grande comasco.

Le ricerche elettrostatiche dei primi due periodi considerati, edite e inedite, sono contenute nel terzo volume dell'edizione nazionale.

Il terzo periodo voltiano è quello dell'elettrometria propriamente detta e della meteorologia elettrica; l'elettrometria occupa parte del quarto volume della stessa edizione, or ora uscito, mentre la meteorologia occuperà tutto il quinto volume, in corso di stampa. I due argomenti però sono strettamente connessi. Il Volta, per scoprire e misurare i più piccoli segni di elettricità atmosferica, affina i metodi di assaggio e metrici, perfezionando gli elettrometri dell'Henley (✠ 1779) e del Cavallo (1749-1809), applicando il condensatore all'elettrometro, sforzandosi di rendere comparabili fra loro i vari elettrometri, servendosi anche della bilancia per la loro taratura, adottando quali campioni elettrometrici di capacità bottigliette di Leyda di date caratteristiche, mirando infine a un elettrometro fondamentale, che più esplicitamente definirà in un manoscritto posteriore alla pila.

Per dare un'idea dei risultati a cui il Volta era arrivato in questo campo, basti il dire che egli riusciva a misurare cariche che stavano tra loro come 1 e 2000.

Due volte egli si avvicinò alla concezione secondo lo schema newtoniano delle azioni elettrostatiche: la prima coll'ipotesi, nelle sue lettere giovanili al Nollet, come è provato da una risposta di questi; la seconda coll'esperimento, misurando per mezzo di una bilancia la cosìdetta pressione dell'atmosfera elettrica; ma in questa seconda occasione gli parve che la legge newtoniana cadesse in difetto nel caso della repulsione di cariche omonime, specialmente se negative; la dimostrazione sperimentale della legge stessa fu data invece, come è noto, dal Coulomb (1736-1806).

Il contributo voltiano alla meteorologia elettrica è notevolissimo: dopo la scoperta dell'elettricità svolgentesi nelle perturbazioni atmosferiche fatta dal Franklin e dell'elettricità atmosferica a ciel sereno fatta dal Le Monnier, dopo i progressi in argomento dovuti alle ventennali ricerche del Beccaria e a quelle del Saussure, il Volta vi porta la sua abilità sperimentale e inventiva e sopratutto il suo fine strumentario elettrometrico. Le lettere al Lichtenberg (1744-99) contengono la parte principale di questi studi, i quali comprendono, tra l'altro, i suoi accorgimenti di esplorazione elettrica dell'atmosfera e la scoperta della conduttività delle fiamme.

Ma in questo campo, coltivato anche nei tardi anni, si deve ricordare un'altra scoperta del Volta: quella della produzione di elettricità durante e per l'evaporazione, scoperta attribuita a torto dall'Istituto di Francia al Lavoisier e al Laplace (1749-1827), che vi sarebbero pervenuti con esperienze fatte presente il Volta; scoperta importante, perchè il fisico nostro pensò per un certo tempo che il fenomeno potesse essere la causa principale dell'elettricità atmosferica.

Il problema elettrostatico delle nubi temporalesche, l'elettricità formantesi nelle cascate, l'utilità e la tecnica dei parafulmini, il periodo dei temporali, la spiegazione delle stelle cadenti, delle aurore boreali, la natura dei terremoti, le sesse lacustri e, infine, notissima, la teoria della grandine furono altrettanti argomenti meteorologici o affini, che in generale il Volta trattò con originalità, chiarezza d'idee e prudenza d'ipotesi in memorie, in lettere, in discorsi accademici.

Si può dire concludendo che in questo terzo periodo, il quale, come s'è detto va dal condensatore alle prime esperienze sulle rane, il Volta, approfondite le sue idee nel campo elettrostatico, affini ulteriormente i suoi istrumenti di misura — indottovi anche dalle sue ricerche di elettricità atmosferica — talchè all'affacciarsi della questione galvanica, egli è pronto e agguerrito ad affrontarla dal punto di vista teorico e da quello sperimentale.

Ci sia permesso di sorvolare qui sulla celebre polemica galvanica, che tanta eco e tante vicende ebbe anche di poi e che condusse il Volta alla pila e ve lo condusse gradatamente e coscientemente; il suo elettrometro, com'egli disse all'Istituto di Francia, accusando deviazioni proporzionali al numero delle coppie bimetalliche, gli aveva suggerito l'ultimo passo.

È interessante inoltre notare che in questo quarto periodo il Volta non fu interamente assorbito dagli studi sul contatto, ma riuscì a importanti risultati nella termologia dei gas e dei vapori, risultati spesso dimenticati in Italia e costantemente ignorati o taciuti all'estero. Il fisico comasco ha infatti preceduto il Gay Lussac (1778-1850) e il Dalton (1766-1844) nell'affermare la legge sulla dilatazione dei gas e quella sulla tensione dei vapori, leggi note sotto i nomi di quegli insigni scienziati. Che se qualche dubbio poteva ancor restare a cagione della formulazione voltiana delle leggi stesse e intorno alla precisione dei risultati voltiani, la luce che in proposito il prof. Guido Grassi sperava dai manoscritti è venuta, secondo il prof. Massardi, pienamente persuasiva. Non solo il Volta esplicitamente attribuisce anche al vapor d'acqua lo stesso coefficiente di dilatazione dell'aria, ma esso coefficiente, determinato da lui in $\frac{1}{216}$ della scala ottantigrada, corrisponde a $\frac{1}{270}$ di quella centigrada, differendo quindi di meno di 5 centomillesimi da quello posteriormente trovato. Risultato tanto più notevole in quanto era allora dibattutissima la questione della costanza del coefficiente di dilatazione dell'aria, sostenuta dal De Luc (1727-1817) e determinazioni analoghe a quella del Volta davano numeri oscillanti fra $\frac{1}{85}$ e $\frac{1}{235}$!

A questi lavori tornò poi il Volta dopo la pila, anche per affermare pubblicamente, ma bonariamente, la sua precedenza. La termologia troverà posto nel sesto volume dell'edizione nazionale, quasi pronto, insieme all'aerologia.

Digitized by Google

L'ultimo periodo voltiano è ancor fervido negli anni immediatamente successivi alla grande invenzione, nei quali il Volta, al colmo della gloria, divulga generosamente e approfondisce la teoria della pila, ne varia le fogge, ne segue, ne ripete le prime applicazioni all'elettrolisi e all'incandescenza dei metalli (o calcinazione, come chiamavasi) e insiste specialmente sull'identità del fluido elettrico col galvanico. Su questo tema scrive la sua ultima poderosa memoria, che chiude degnamente il ciclo incominciato col *De vi attractiva* e che per lungo tempo fu attribuita al suo successore, il Configliacchi (1777-844): le ultime tangibili prove dell'ormai certa paternità voltianafurono trovate e pubblicate dal sac. Achille Ratti, ora S.S. Pio XI.

L'elettrodinamica occupa i due primi volumi dell'edizione nazionale e coi suoi complementi anche una parte del quarto volume, nel quale è pure un saggio interessantissimo della didattica voltiana nella disciplina in cui egli fu sommo: l'elettricità.

Dopo la classica memoria citata, l'attività del Volta si fa più calma e poi frammentaria; torna egli tratto tratto a' suoi studii prediletti, rievocando o riprendendo temi già trattati; ritorna tra l'altro con speciale entusiasmo alle esperienze e alle misure elettrostatiche, come se avesse intuito che, pur dopo la nascita e il trionfo dell'elettrodinamica, le questioni elettrostatiche sarebbero ritornate in onore, assumendo importanza anche nel campo pratico.

La sua mente si conserva lucida e forte sino alla tarda vecchiezza, checchè ne dicessero poi il Biot (1774-1862) e l'Arago (1786-1853): però cure accademiche e pubbliche, ma più che tutto famigliari e in particolare l'educazione e l'istruzione dei figli lo occupano oramai.

È questa una simpatica caratteristica sua: dopo tanto lavoro, dopo il supremo trionfo di Parigi, dopo le medaglie della Società Reale di Londra e dell'Istituto di Francia, la corona comitale e il laticlavio napoleonici, ritenne egli di potersi a poco a poco ritarre dall'agone, per dedicarsi a cure più tenui, ma altrettanto dolci pel suo cuore semplice, pel suo spirito sereno.

E si ritrasse poi definitivamente anche dalle cariche onorifiche dell'Università pavese verso il 1819, nella sua Como dilettissima, alternando il soggiorno estivo nelle villeggiature di Camnago e di Lazzate. A Como morì il 5 Marzo 1827, a 82 anni, lo stesso giorno della morte del Laplace.

Questa rassegna, per quanto arida, dell'opera voltiana, aveva lo scopo di lumeggiare la sua fisionomia scientifica (anche all'infuori della sua massima invenzione) come si addiceva al carattere della severa commemorazione espressa da questo fascicolo.

Se a ciò non sono riuscito, avrò almeno richiamato l'attenzione su una grande impresa della scienza italiana d'oggi — alla quale l'elettrotecnica italiana ha offerto il suo aiuto generoso — sul più alto monumentoche si sta erigendo al Volta: l'edizione nazionale delle Sue opere.

Essa è stata possibile solo dopo il laborioso e sagace riordino critico delle carte voltiane del R. Istituto Lombardo, compiuto amorosamente dal nipote prof. A. Volta junior; essa è stata primamente da lui invocata e proposta, in occasione del centenario della pila; è bello che entro quest'altro anno centenario sia compiuta.

L'edizione nazionale, meglio di ogni rassegna e di ogni commento, dirà tutto il pensiero, tutta l'opera, tutta la gloria di Alessandro Volta.

Digitized by Google

PROF. ELIGIO PERUCCA

R. SCUOLA D'INGEGNERIA DI TORINO

150 ANNI DI ELETTROSTATICA

Digitized by Google

Digitized by Google

1. - Tutta l'elettrologia può dividersi in due grandi parti: elettrostatica (studio dell'elettricità in equilibrio), elettrocinematica (studio dell'elettricità in moto).

Sebbene nell'ultimo trentennio le nostre conoscenze sulla conduzione attraverso i gas si siano tanto accresciute da costituire un ampio capitolo a sè, logicamente staccato dall'elettrostatica (1), pure in taluni libri di fisica anche recenti (2) si trova conveniente conglobare nella prima parte dell'elettrologia lo studio delle scariche elettriche e dei loro effetti.

Ciò mi permette di cominciare dicendo che, al tempo di Volta, solo parte dell'elettrostatica era nota; tutto il resto dell'elettrologia fu reso possibile dalla scoperta della pila. Il rapporto tra questo articolo e gli altri tutti che costituiscono questo numero unico, dà una chiara idea della strada immensa aperta da Volta alla scienza e alla civiltà.

Dell'elettrostatica erano noti, all'inizio dell'opera scientifica di Volta (1769) (3), i fenomeni fondamentali quasi tutti: note le due specie di elettricità e le azioni tra di esse (Dufay, 1733), nota la produzione per strofinio di elettricità delle due specie in quantità equivalenti (Franklin, 1747; Epino, 1759); nota la distinzione tra isolatori e conduttori (Gray e Wheler, 1729), e la rapidità enorme di trasmissione del *fuoco elettrico* lungo i fili metallici (Le Monnier, 1746; Watson, 1747); nota la proprietà fondamentale del *pozzo elettrico* (De Saussure, 1766; Franklin e Priestley, 1766-1767; Beccaria, 1769); noto il *potere delle punte* (Franklin, 1747).

(1) È però da notare che lo studio della conduzione attraverso i gas richiede più frequenti richiami all'elettrostatica, e che non è possibile sviluppare l'elettrostatica senza conoscere almeno qualitativamente i fenomeni fondamentali della conduzione elettrica e in particolare delle scariche elettriche e dei loro effetti; v. ad es. WINKELMANN: *Hand. der Phys.*, 4° vol., Leipzig, 1905, p. 42. Analogamente in meccanica non è possibile svolgere la statica senza conoscere, sia pur qualitativamente, l'azione dinamica delle forze.

(2) H. PELLAT: *Cours d'électricité*, 1° vol., Paris, 1901; A. ROITI: *Elementi di fisica sperimentale*, 2° vol., Firenze, 1903-1904; M. CANTONE: *Corso di Fisica Sperim.*, 2° vol., Napoli, 1920.

(3) Dal 3° vol. dell'*Edizione Nazionale*, tuttora incompleta, delle Opere Voltiane, risulta che Volta scrisse lettere su argomento elettrico fin dal 1765 almeno; ma il lavoro del 1769 *De vi actractiva ecc.* apre la carriera scientifica ufficiale del Volta. I miei richiami si riferiranno all'edizione dell'Antinori (Firenze, 1816).

Ed erano conosciuti, sebbene male interpretati, i fenomeni di induzione (Hawskbee, 1709; Canton, 1753; Epino, 1759) e i fenomeni di condensazione (*bottiglia di Leyda*, 1745-1746; Franklin, 1747). Sia pur limitatamente ai fenomeni presentati dalla bottiglia di Leyda, era già stata osservata l'influenza del mezzo isolante sui fenomeni elettrici (Musschenbroek, 1746); ed era già nota la classica ma poco probante esperienza della *bottiglia scomponibile* (Franklin, 1748).

Erano già conosciute varie *sorgenti di elettricità*: la triboelettricità (distinta allora in molte categorie: elettrizzazione per strofinio, per rottura, per pressione, per solidificazione....), l'elettrizzazione per induzione (Canton, 1753), la piroelettricità (Epino, 1756), l'elettricità atmosferica (Franklin, 1752-1753). Walsh si preparava alle esperienze sulla torpedine (1772) che stabilirono con sicurezza l'esistenza, già da tempo sospettata, dell'elettricità animale.

Una buona dozzina di macchine elettrostatiche a strofinio poneva già nell'imbarazzo della scelta i miei colleghi di allora; la macchina di Ramsden (1766) era *up to date*.

Il *fuoco elettrico* appariva a biologi, medici e ciarlatani come il fluido vitale, come la fonte di una nuova terapeutica, come la panacea universale; scienziati di grido e dilettanti gareggiavano nell'attribuire all'*elettricismo* gli uragani e le trombe marine, le eruzioni e i terremoti, i fuochi fatui e le stelle filanti.

Nel momento in cui era strappato alla natura il segreto di una nuova e più potente fonte di elettricità (l'atmosferica), questa aveva voluto, per l'onore della scienza, la sua prima vittima (Richmann, 1753).

2. - Alla teoria dell'elettricità, cioè al coordinamento logico dei numerosi fatti già noti, avevan posto mano già vari scienziati ed era in pieno sviluppo la lotta tra frankliniani e symmeriani (1).

Franklin, non inferiore ad alcuno per la chiarezza di intuito che dimostrò nello studio dei fenomeni elettrici (2), aveva supposto (1746-1750) l'esistenza di un unico fluido elettrico mobile; la materia for-

(1) V. ad es. tutta l'opera dell'abate NOLLET, e G. B. BECCARIA: *Dell'elettricismo artificiale e naturale*, Torino, 1753, p. 235 e segg.

(2) B. FRANKLIN: *The works, by Jared Sparks*, Boston, 5° vol., 1837.

Digitized by Google

nita di un'opportuna dose di fluido risulta allo stato neutro ; se il fluido elettrico è in eccesso, la materia appare carica *in più* o positivamente ; se quello è in difetto, questa appare carica *in meno* o negativamente. Un unico fluido può dunque dar ragione dell'esistenza delle due specie di cariche. È parte intrinseca della teoria di Franklin il principio della conservazione dell'elettricità, sicchè fin d'allora dovevano intendersi per *sorgenti di elettricità* i dispositivi capaci di separare cariche di nome diverso, cioè spostare il fluido elettrico. Questo principio, ammesso tacitamente da tutti i fisici anche non franklíniani, sarà enunciato esplicitamente solo da Lippmann (1881) e sfruttato nel modo brillante che vedremo.

Nella teoria di Symmer (1759) si suppone l'esistenza di due fluidi elettrici mobili, quelli che già Dufay (1733) aveva chiamati *vitreo* e *resinoso ;* sol quando la materia contiene in egual misura i due fluidi, essa appare neutra. Lo stato neutro di un corpo può dunque pensarsi in infiniti modi tra loro distinti ; la teoria era dunque complicata più del necessario.

Ma queste immagini, capaci tutt'al più di coordinare qualitativamente i fenomeni noti, potevano dirsi *teorie* quando mancava una definizione di *quantità di elettricità* e l'unico apparecchio che tentasse di misurarla era la recentissima bottiglia di Lane (1766-1767) ? Si poteva parlare di teoria elettrica quando il concetto, sia pur qualitativo, di *intensità della carica* o *grado di elettrizzazione*, di potenziale di un conduttore insomma, era tuttora in incubazione ? *Elettrometri* : sì, nel 1772 si potrà già scegliere tra quello a una pallina (elettrometro a quadrante di Henley, 1772) e quello a due palline di sambuco (Canton, 1753). Ma nessuno sapeva chiaro se indicassero la quantità di elettricità o la tensione di questa, o l'una e l'altra cosa in quanto tra loro in proporzione.

Eppure una teoria matematica dell'elettricità era già stata tentata (Epino, 1759) (1) e vi si osava persin supporre, per analogia con quanto era noto per la gravitazione universale, che le azioni elettriche variassero in ragione inversa al quadrato delle distanze (2). E ciò veniva confermato da Priestley (1767), che, pare per suggerimento di Franklin, già deduceva dalla mancanza di azione elettrica nell'interno di una sfera cava, la validità di una tal legge newtoniana. Però.... siccome l'esperienza riusciva ugualmente in un conduttore cavo di forma non sferica, non mancarono le più autorevoli critiche alla *pretesa* di dedurre da questa esperienza la validità della legge newtoniana (3).

3. - L'opera quasi contemporanea di due grandi, Volta e Coulomb, ha fornito all'elettrostatica gli elementi necessari per renderla uno dei capitoli più interessanti della fisica matematica.

Coulomb (1784-1788), mentre dotava la tecnica sperimentale della *bilancia di torsione*, di ammirevole sensibilità per scoprire e misurare deboli forze, progenitrice di tutti i moderni apparecchi di misura e sospensione, dava alla fisica la nota legge di aziona tra le masse elettriche, che permetteva la definizione precisa e la misura della *quantità di elettricità*, e rendeva finalmente proficua l'introduzione dei segni + e — per le cariche elettriche (Lichtenberger, 1777). Egli studiava sistematicamente per il primo la distribuzione dell'elettricità sui conduttori, riconoscendo che tal distribuzione è superficiale, che essa è uniforme solo in casi particolarmente simmetrici, che infine la natura del conduttore non influisce sulla distribuzione dell'elettricità in equilibrio.

Il valore dell'opera di Coulomb è così grande, e l'influsso che essa esercitò sull'ulteriore sviluppo dell'elettrostatica è così decisivo, che nessuna menomazione al merito di Coulomb può venire dall'aver ricordato i precedenti contributi di Epino e di Priestley in favore della legge dell'inversa del quadrato, nè viene dal notare che « il celebre Deluc sembra abbia fatto uso, già prima del Coulomb, del piano di prova » (1), o dal citare le esperienze di John Robison che dalle misure dirette delle forze già nel 1769 deduceva che queste si affievolivano in ragione inversa della potenza 2,06 della distanza (2).

È il Volta (1778) a stabilire e usare con una chiarezza stupefacente i concetti fondamentali di *carica, tensione* o *intensità di carica* (3), *capacità* di un conduttore ; e, mentre si lascia sopravanzare dal Coulomb per quanto riguarda la misura delle cariche, il Volta per il primo (1782) tara in *gradi equivalenti* un *quadrante elettrometro* di Henley, cioè per il primo usa esattamente questo apparecchio per la misura del potenziale di un conduttore, trasformandolo in un vero *elettrometro* secondo il significato che si dà ora a questo termine ; e dopo qualche tempo (1787-1788) Volta descrive il primo, sia pur rudimentale, *elettrometro assoluto* (4).

Ben si addice dunque il nome proposto da Latimer Clark (1861) per l'unità pratica di differenza di potenziale, nome che rende nota la fama del nostro grande all'operaio, al contadino, all'umile donna di casa del mondo intero.

Ma il contributo di Volta all'elettrostatica non si limita a quello ora accennato, e, da solo, è sufficiente a caratterizzarne il genio. Il Volta, con l'*elettroforo perpetuo* (1775-1778) ha dato alla fisica il *puzzling* progenitore di tutte le macchine elettrostatiche a moltiplicazione di cariche per induzione, quasi esclusivamente ora in uso ; e di queste già indicava l'autoeccitabilità (5) a proposito di una delle prime macchine del genere, il *duplicatore* di Nicholson (1788).

(1) AEPINUS : *Tentamen teoriae electricitatis et magnetismi.* Petropoli, 1759.
(2) AEPINUS, loc. cit., p. 38-39.
(3) T. CAVALLO : *A complete treatise on electricity.* 1777, trad. franc., Paris, 1785, p. 154.

(1) M. ZANNOTTI : *Elementi di fisica.* Napoli, 1850, 2° vol., p. 39, nota.
(2) E. T. WHITTAKER : *A history of the theories of aether and electricity.* Dublin, 1910, p. 51, nota. Non mi è riescito di trovare i lavori originali in questione nè di Deluc nè di Robison.
(3) Cioè potenziale del conduttore rispetto al suolo o, più precisamente, rispetto alle pareti della stanza in cui si fanno le esperienze.
(4) Opere di VOLTA, 2° vol., p. 73 : *Meteorologia elettrica,* lettera 2ª, 1787-1788.
(5) Opere di VOLTA, 4° vol., p. 50 : *Sull'elettricità eccitata dal contatto dei conduttori dissimili,* lettera 2°, 1796.

Digitized by Google

Al Volta si deve (1782) la descrizione chiara, completa del fenomeno di *condensazione*, e il primo confronto di capacità fra un conduttore e un *condensatore* (bottiglia di Leyda) (1778); realizzando un conduttore unico di capacità paragonabile a quella di una bottiglia di Leyda, mostrò come la diversità degli effetti osservati non dipendesse che dalla diversa capacità che presentano una bottiglia di Leyda e un conduttore isolato di dimensioni ordinarie. Le esperienze che così il Volta ebbe occasione di fare sull'induzione elettrostatica (1), pur senza aggiungere nulla di nuovo a questo fenomeno già perfettamente descritto da Epino, contribuirono con efficacia unica a diffonderne la conoscenza e la giusta interpretazione.

L'elettroscopio a pagliuzze di Volta (1781) fu presto sostituito dall'elettroscopio a foglie d'oro (Bennet, 1787), ma l'invenzione dell'*elettroscopio condensatore* (1782) segnò una data memorabile, perchè, nella misura delle differenze di potenziale, permise di moltiplicare per mille la sensibilità di uno qualunque degli elettroscopi già noti. E non voglio passare sotto silenzio l'egualizzatore di potenziali a fiammella (1787) non tanto per ribadire una questione di priorità col Bennet per lo meno antipatica dopo quanto ha scritto lo stesso Volta (2), ma piuttosto per segnalare alcune delle pagine del Volta che più mi hanno colpito come esempio di logica sperimentale meravigliosa (3).

Ancora devesi al Volta la scoperta di taluni nuovi metodi di elettrizzazione (per evaporazione (?), per ebollizione violenta, per combustione, 1782) sui quali non è detta l'ultima parola, e un non disprezzabile contributo (1788-1789) all'elettrizzazione per spruzzamento (Tralles, 1786), ciò che gli fece pensare trovata l'origine dell'elettricità atmosferica.

E dal punto di vista elettrostatico, la pila di Volta (1794-1800) che cosa è se non un nuovo metodo di separazione delle cariche opposte, di creazione di differenze di potenziale, cioè una nuova *sorgente di elettricità* statica?

Infine l'*effetto Volta* puro, cioè la differenza di potenziale al contatto tra due conduttori *di prima classe*, permettendo di fare una serie delle tensioni (Volta, 1802), ha dato modo di distinguere elettrostaticamente i vari metalli, che in una prima approssimazione, tutt'oggi spesso sufficiente, risultano elettrostaticamente equivalenti (Coulomb, 1786).

4. - Opera poderosa dunque, e che da sola è ben sufficiente a render famoso un nome. Ma all'elenco arido delle scoperte sfugge talvolta il valore dell'impulso che la Scienza ne riceve, sfugge spesso la possibilità di giudizio sul valore intellettuale dell'autore. Leggere bisogna le pagine del Volta, e leggere le pagine dei trattati sull'*elettricismo* allora in massimo onore e le pagine dei trattati che immediatamente seguirono, per convincersi che Volta non aggiunse alle conoscenze scientifiche un gruppo di nozioni, ma, sia pure coadiuvato dal contemporaneo rinnovamento della chimica, mutò il modo con cui sull'elettricità si pensava. Annoiandoci talvolta perchè prolisse, sorridendo talvolta per quell'italiano lezioso che dalla decadenza avevamo ereditato, pagine di Volta possiamo leggere tuttora perchè elettricamente perfette (1); così come leggiamo stupefatti alcune pagine di Franklin (2).

La chiaroveggenza fu tale in Volta da vederlo con stupore, lui, l'uomo elettrico per eccellenza, vederlo avvertire che i dominî dell'elettricità non vanno estesi oltre i confini e

« .... non devesi tutto attribuire all'elettricità, nonchè i temporali, le trombe di mare e di terra, le aurore boreali, ma le stelle cadenti e i bolidi, e piogge e venti e rugiada e tremuoti ed eruzioni vulcaniche, quanti insomma v'hanno fenomeni o puramente atmosferici, o terrestri atmosferici, per nulla dire dell'economia vegetabile ed animale » (3).

5. - Trentennio unico forse nella storia per le trasformazioni sociali che avvennero, trentennio che vide la grande rivoluzione nelle piazze, che preparò con Watt la grande rivoluzione nelle officine e nei mezzi di trasporto, che vide nascere la nuova America di Franklin; trentennio unico nella scienza, che vide stabilire la conservazione della materia, apparire la nuova chimica, creare la pila.

Trentennio che rinnovò l'elettrostatica.

Con vivo senso di rammarico (ma senza lo sdegno di Heaviside), nell'accennare ai grandi che contribuirono a fondare l'elettrostatica moderna, io devo tacere il nome di Cavendish, lo strano fisico inglese che stabilì tra il 1770 e il 1780 la validità della legge dell'inversa del quadrato delle distanze per le azioni elettriche (dedotta indirettamente dalle proprietà dei conduttori cavi), precisò il concetto di *grado di elettrizzazione* di un conduttore (potenziale), di *capacità elettrostatica* per un conduttore o per un condensatore; dedusse che la capacità di conduttori simili varia come le loro dimensioni lineari, e tali capacità giunse fino a misurare in *globe inches of electricity*, cioè in pollici di diametro della sfera di capacità pari a quella del conduttore in istudio.

Stabilita l'influenza del mezzo sulla capacità di un condensatore, determinò per vari isolanti quello che più di sessanta anni dopo Faraday, con esperienze analoghe, riscoprì e disse *capacità induttiva specifica* e ora dicesi *costante dielettrica*; nei tentativi di determinazione del valore numerico di tale costante ebbe presto occasione di osservare pel vetro i fenomeni di dielettricità susseguente e di scarica

(1) V. in partic. la memoria *Sul condensatore*, parte 2ª, 1782; Opere di VOLTA, 1° vol., p. 249.

(2) Op. di VOLTA, 2° vol., p. 147, nota; *Meteorologia elettrica*, lettera 4ª, 1788.

(3) Op. di VOLTA, 2° vol., p. 92 e segg.; *Meteorologia elettrica*, lettera 2ª, 1787-1788.

(1) Cito un po' a caso: *Sulla capacità dei conduttori elettrici*, 1778 (Op. di VOLTA, 1° vol., p. 167) e in particolare le pagg. 205-208 sull'influenza del suolo e dell'imperfetto isolamento (si parla ancora di *fuoco elettrico*); *Sull'elettricità eccitata dal contatto dei conduttori dissimili*, lettera 2ª, 1796 (Op. di VOLTA, 4° vol., p. 41-45); *Sull'identità del fluido elettrico ecc.*, parte seconda, §§ 51-52, 1801 (Op. di VOLTA, 4° vol., p. 222).

(2) V. p. es. le istruzioni che il Franklin dava (1767) per ripararsi dal fulmine.

(3) Op. di VOLTA. 2° vol., p. 200-201: *Meteorologia elettrica*, lettera 5ª, 1788.

Digitized by Google

residua, e concluse quindi per l'impossibilità di ottenere un campione di capacità mediante un condensatore a vetro.

Infine è del Cavendish una prima serie di deduzioni logiche dalla legge dell'inversa del quadrato, che, come già il lavoro di Epino, costituiscono un primo abbozzo di teoria matematica dell'elettrostatica.

Di tutta questa opera il Cavendish rese noto « *An attempt to explain some of the principal phenomena of electricity, by means of an elastic fluid* » (1771), ove si sente dominare la legge dell'inversa del quadrato, e par quasi che l'autore si prepari a cadervi per assurdo, ma intanto la schivi a bella posta..... e un lavoro sui fenomeni di elettricità animale presentati dalla torpedine (1776).

L'influenza di un uomo così eccezionale, particolarmente privilegiato per una abilità sperimentale veramente superiore e una preparazione matematica che forse mancò al Volta, fu dunque quasi nulla sullo sviluppo della scienza elettrica.

La rivelazione della opera di Cavendish, nota per lungo tempo solo a pochi privilegiati (1), si ebbe solo un secolo più tardi, quando, per cura paziente e sagace di Maxwell, i manoscritti del Cavendish videro la luce (2).

6. - Sembrava dunque che, stabiliti i concetti che ne costituiscono la base, l'elettrostatica potesse più rapidamente seguire la via del suo sviluppo sperimentale e teorico. Non fu così. Per quasi mezzo secolo, da Volta (1790) a Faraday (1837), l'elettrostatica deve subire una stasi.

È vero, sono di questo periodo le teorie di Avogadro (1806-1807) sulla costituzione elettrica della materia e sulla funzione del dielettrico nella bottiglia di Leyda, e i lavori classici di Poisson (1811-1813; 1824) costituenti il primo abbozzo della teoria moderna dell'elettrostatica, che diremo coulombiana perchè fondata sulla legge di Coulomb. In questo periodo nasce l'elettroscopio di Bohnenberger (1815) progenitore di tutti gli elettrometri a *campo ausiliario*, e la piroelettricità ha il suo battesimo scientifico-cristallino per merito di Haüy (1796) e di Brewster (1824) che pensò anche a coniarne l'inadatto nome greco (3).

In quel periodo di tempo il Belli (1831) descrisse il primo *duplicatore* semplice e simmetrico.

Ma non questo volevo dire ; fu stasi per l'elettrostatica perchè non furono compresi e ulteriormente migliorati i concetti fondamentali dovuti a Volta e a Coulomb.

(1) Ecco quanto scriveva W. THOMSON nel 1849 : « Sir W. Snow Harris has been showing me Cavendish's impublished MSS., put in his hands by Lord Burlington.... ; a most valuable mine of results.... It is much to be desired that those MSS. of Cavendish should be published complete ; or, at all events, that their safe keeping and accessibility should be secured to the world ! ».

(2) *The electrical researches of the* HON. H. CAVENDISH, edited by J. C. Maxwell, Cambridge, 1879.

(3) HANKEL, che, verso la metà del secolo scorso, ha fatto numerose ricerche in questo campo, continuò a lungo a parlare di *termoelettricità* dei cristalli, termine che gli sembrava ed è forse più appropriato, ma che l'uso ha riservato ora universalmente a tutt'altro fenomeno.

Nel 1833 Faraday (*Exp. Res.*, n. 360, nota) doveva ancor dichiarare che *quantità* e più ancora *intensità* dell'elettricità erano concetti non sufficientemente definiti ; doveva dedicare una lunga memoria (*Exp. Res.*, III Ser.) per dimostrare l'identità dei fluidi elettrici comune, animale e voltaico, identità che Volta aveva stabilito con esattezza stupefacente nel 1801 (1).

Nel 1834-36 Snow Harris, con tutta una serie di ricerche, tentava di mostrare la fallacia della legge di Coulomb, portando argomenti tali che la cosa migliore in questi suoi lavori è.... l'invenzione della bilancia a sospensione bifilare.

Nel 1834-1840 si pubblicava in sette volumi un trattato di elettricità e magnetismo (2), ove i concetti essenziali dell'elettrostatica (capacità, tensione elettrica cioè potenziale, condensazione) non vengono presentati con quella chiarezza e quella precisione che, grazie all'opera di Volta, sarebbero già state possibili.

L'elettrostatica, soverchiata dall'*elettricità voltaica*, assiste trascurata all'imponente sviluppo dell'elettrochimica, dell'elettromagnetismo, dell'induzione elettromagnetica. Figurarsi se qualcuno pensò di registrare, con la *termoelettricità* (Seebeck, 1821), un nuovo metodo, sia pure un po' sparuto, di separazione delle cariche elettriche opposte.

7. - E così nessuno si avvide che la teoria coulombiana, come ammirevole capitolo della fisica matematica, era nata, e con essa era creata, per merito di Green, la *teoria del potenziale* (1828).

Occorse l'opera quasi contemporanea di Faraday (3), Riess (4), Gauss (5), W. Thomson (6) per far risorgere a nuova vita l'elettrostatica e fermare l'attenzione dei matematici sul poderoso lavoro di Green.

Quale sorte oscura era toccata a quest'opera !

Costretto, a quanto pare, da questioni di priorità su teoremi enunciati anche da Gauss e da Chasles, W. Thomson :

« .... found that these theorems had been discovered and published in the most complete and general manner, with rich applications to the theories of electricity and magnetism, more than ten years previously, by Green ! Il was not until early in 1845 that the author [Thomson] after having inquired for

(1) Op. di VOLTA. 4° vol., p. 167, 195 : *Sull'identità del fluido elettrico col fluido galvanico*, 1801 ; in particolare i già citati §§ 51, 52.

(2) A. C. BECQUEREL : *Traité exper. de l'électr. et du magnétisme*, tomi sei, Paris, 1834-1840.

(3) 1837-1838 : azione del mezzo nei fenomeni elettrostatici, *Exp. Res.*, XI, XII, XIII, XIV Ser.

(4) Dal 1836 (Sulla condensazione) in poi, fino al 1883. Particolarmente : Nuove esperienze sulla legge di Coulomb; determinazione sperimentale dell'energia della scarica.

(5) 1840. *Allgemeine Lehrsätze in Beziehung auf die im verkehrten Verhältnisse des Quadrats der Entfernung wirkenden Anziehungs und Abstossungs Krätfe ;* caratteristico il fatto che alla funzione $V = \int \frac{dm}{r}$ Green e dodici anni dopo Gauss abbiano dato, indipendentemente uno dall'altro, due nomi praticamente uguali : *funzione potenziale* (Green) e *potenziale* (Gauss).

(6) 1842-1850 : Teoria matematica dell'elettricità, *metodo delle immagini.*

Digitized by Google

281013

it in vain for several years, in consequence of an obscure allusion to it in one of Murphy's papers, was fortunate enough to meet with a copy of the remarkable paper (*Essay on the application of mathematical analysis to the theories of electricity and magnetism*, by George Green, Nottingham, 1828) in which this great advance in physical mathematics was first made » (1).

Risultava dunque introvabile ed ignorato il lavoro nel quale non solo si trovano le basi, ma è solidamente sviluppato tutto il corpo della teoria matematica dell'elettrostatica e della magnetostatica. Era sfuggito ai fisici e ai matematici il lavoro col quale veniva fondata la classica teoria del potenziale, e trasformato il problema generale dell'elettrostatica (2) in un preciso problema matematico, più particolarmente in una ricerca di funzioni armoniche (problema di Dirichlet).

Questa ricerca non è facile ; tranne casi specialissimi ci possiamo dire tuttora fermi al problema di esistenza e di unicità della soluzione (Green, 1828 ; Thomson, 1848).

Oltre i casi elementari (sfera, condensatore sferico, cilindro e condensatore cilindrico indefiniti, piano e condensatore piano indefiniti, tutti in dielettrico omogeneo) e il caso dell'ellissoide per cui bastò applicare all'elettrostatica considerazioni già note per il caso dell'azione newtoniana, Poisson potè faticosamente aggiungere, all'elenco dei problemi generali di elettrostatica risoluti, il caso delle due sfere (ripreso poi da Plana, 1845 ; W. Thomson, 1853 ; Kirchhoff, 1861, 1885 ; Russel, 1922). Ebbene, grazie al *teorema dello strato equivalente* di Green, si aggiunse di colpo un infinito numero di forme dei conduttori per cui il problema è risolubile.

Mi soffermo sull'opera di Green non solo perchè essa, sebbene conosciuta ed apprezzata solo col rifiorire dell'elettrostatica, ha un valore intrinseco forse unico nella storia del progresso della fisica matematica, ma perchè non si possono leggere senza commozione alcuni periodi della prefazione che questo autodidatta, figlio di mugnaio e mugnaio egli stesso, scrisse per il suo *Essay*, potuto pubblicare *by subscription* :

« I should have been glad to have given, in this place, an historical sketch of its progress ; my limited sources of information, however, will by no means permit me to do so ».

Egli infatti non cita che Cavendish, Poisson, Laplace.... e chi altro doveva citare ?

E concludendo :

« It is hoped the difficulty of the subject will incline mathematicians to read this work with indulgence, more particularly when they are informed that it was written by a young man, who has been obliged to obtain the little knowledge he possesses, at such intervals and by such means, as other indispensable avocations which offer but few opportunities of mental improvement, afforded ».

Chieder venia ai matematici ai quali offriva una miniera, a cui attinsero si può dir tutti i fisici matematici del secolo scorso (1) per le teorie classiche del potenziale, dell'elasticità, dell'idrodinamica !

Di fronte all'opera di Green si sente sminuito il bel lavoro di Gauss che pur contiene un nucleo ammirevole di teoremi sul campo elettrostatico, e in particolare il famoso *teorema di Gauss* sul flusso di forza uscente da una superficie chiusa ; si disabbellisce il fecondissimo contributo di W. Thomson all'esposizione logica e matematica dell'elettrostatica (1842-1848) cui dà la fisionomia della trattazione moderna, e alla risoluzione del problema generale dell'elettrostatica (*metodo delle immagini* ; teoremi di minimo, di esistenza, di unicità, 1845-1850).

Al sommo della scala dei valori, l'elettrostatica ci indica due uomini ai quali dobbiamo guardare con ammirazione e simpatia particolare, quando si pensi alle condizioni di vita nelle quali il loro genio seppe farsi valere : Green e Faraday.

8. - Mentre la teoria matematica dell'elettrostatica coulombiana si affermava definitivamente per merito di Green, Gauss, W. Thomson, anche l'elettrostatica sperimentale si trasformava radicalmente mediante l'opera di Faraday e, dopo la metà del secolo, dello stesso W. Thomson.

Dobbiamo infatti a Faraday taluni metodi di misura delle grandezze fondamentali elettrostatiche che tuttora sono in uso : il *galvanometro balistico* (1833) per la misura della carica di un condensatore (mediante la scarica di questo) ; il *pozzo di Faraday* (1843) per il confronto delle cariche che può così compiersi in modo ben più comodo che con la bilancia di Coulomb ; il metodo della sferetta indotta (1837) per studiare punto per punto un campo elettrostatico, più precisamente per determinare la differenza di potenziale tra un punto del campo e il suolo ; un metodo di confronto di due capacità (1837-1838) che gli permise la misura della *capacità induttiva specifica* (2) di ciascun mezzo isolante.

Tutti conoscono infine le classiche esperienze del *pozzo di Faraday* per mostrare le proprietà dell'induzione totale (3), e degli schermi elettrostatici (1843).

Tentò inutilmente il Faraday di scoprire differenze di *capacità induttiva specifica* per le varie direzioni di un cristallo anisotropo (Boltzmann, 1873), e dif-

(1) *Reprint of papers on electr. and magn.*, 1872, p. 2, nota. E poi ancora a p. 126, nota : « Ever since [1842 ?] I have been trying to see Green's memoir, but could not hear of it from anybody, till to day (25 jan. 1845) when I have got a copy from. Mr. Hopkins ».

(2) Dati i conduttori presenti nel campo, e la natura del dielettrico, cioè la costante dielettrica ε in cui sono immersi, omogeneo o no, data la distribuzione di elettricità nel dielettrico e il potenziale o la carica totale su ciascun conduttore, determinare il potenziale $V(x, y, z)$ in ciascun punto del campo (e la densità $\sigma = -\frac{\varepsilon}{4\pi}\frac{dV}{dn}$ su ogni punto della superficie dei conduttori).

(1) V. p. es. i cenni storici in : P. DUHEM : *Leçons sur l'électricité et le magnétisme*, 1° vol., Paris, 1891, passim.

(2) Ora vien detta più spesso *costante dielettrica* (BOLTZMANN, 1872), sebbene, a causa delle numerose anomalie dei dielettrici reali, non si tratti quasi mai di una *costante*. Anche Faraday, come già Cavendish, disturbato da queste anomalie, si limitò a poche determinazioni numeriche.

(3) Il conduttore indotto è cavo e nella cavità è la carica inducente, la quale è quindi completamente circondata dall'indotto.

STATE UNIVERSITY OF IOWA LIBRARY
Digitized by Google

ferenze nella costante dielettrica dei vari gas tra di loro e per rispetto al vuoto (Boltzmann, 1874); così pure cercò invano una birifrangenza nei dielettrici isotropi, dovuta alla presenza in essi di un campo elettrico (Kerr, 1875). In compenso Faraday ci ha dotato del più potente mezzo di separazione di cariche elettriche, quindi di creazione di campo elettrico, fino ad oggi conosciuto : l'*induzione elettromagnetica* (1831-1832).

Valore pari al contributo sperimentale ha l'opera concettuale del Faraday. A lui dobbiamo la segnalazione precisa dell'importanza elettrostatica, già intravista fin dalle prime esperienze sulla bottiglia di Leyda, della natura del mezzo isolante e dell'opportunità di pensarlo come *dielettrico*, cioè come costituito da particelle materiali contenenti cariche uguali e di segno opposto e polarizzabili (1).

Creatore del concetto fecondissimo di *linea di forza* (1831 per il magnetismo, 1837-1838 per l'elettrostatica e poi continuamente rielaborato fino agli ultimi lavori) donde prese origine il concetto di *campo di forza*, fu propugnatore tenace dell' *induzione* come fenomeno fondamentale di tutta l'elettrostatica. Sebbene manchi negli scritti del Faraday una molto chiara definizione di questa *induzione*, a me pare che Faraday intenda per *principio dell' induzione* sia il principio della conservazione dell'elettricità, sia il *teorema delle superficie corrispondenti* : non si riesce a creare cariche elettriche ma solo a separarne quantità uguali ed opposte, quindi ogni tubo di forza uscente da un corpo carico positivamente trova necessariamente modo di terminare su di un corpo carico negativamente, idea questa comodissima anche per non aver mai da considerare linee di forza che vanno all' infinito. Di più in questa *induzione*, Faraday cela anche ciò che ora chiamasi *polarizzazione* del dielettrico ; egli fa sua l' idea di Avogadro e di Mossotti di paragonare cioè le molecole del dielettrico a piccoli conduttori ; per effetto del campo elettrico questi si *polarizzano*, cioè, per l'induzione elettrostatica che subiscono, vengono a caricarsi di elettricità eguali ed opposte ai due estremi.

Infine si attribuisce comunemente a Faraday l'idea di sostituire all'azione coulombiana a distanza, l'azione a contatto del mezzo dielettrico (ponderabile o vuoto). Nella tensione delle linee di forza pensate quasi come fili elastici che cercano di accorciarsi, accompagnata da una contemporanea trazione laterale che tende a distaccare tra di loro queste linee come se si respingessero, è l'origine delle azioni ponderomotrici che si manifestano a un osservatore meno perspicace come attrazioni o repulsioni coulombiane a distanza. Ma di questo riparleremo.

9. - L'impressione che l'opera di Faraday produsse tra i fisici fu enorme ; si dubitò del valore dei lavori di Coulomb e di Poisson, della validità dunque di quel pò di acquisito e di quantitativo che dalla legge di Coulomb era stato dedotto e formava la *teoria dell'elettrostatica* (1). Ma dagli stessi scritti di Faraday è chiaro come questi non intendesse per nulla porre in discussione la legge di Coulomb (2), ma soltanto far partecipare anche il mezzo dielettrico ai fenomeni e alle azioni elettrostatiche.

D'altra parte fu facile per W. Thomson dimostrare (1845) che i fatti noti si possono spiegare tutti sulla base della legge di Coulomb, purchè in dielettrico omogeneo il potenziale, e quindi la forza, in ogni punto del campo vengano divisi per la costante dielettrica.

Gouy (1896) svilupperà ulteriormente questo stesso concetto per il caso di dielettrico non omogeneo. Nello stesso lavoro (1845) W. Thomson presume che la polarizzazione del dielettrico, immaginata analogamente a quanto fa Poisson per la polarizzazione magnetica nel magnetismo indotto, possa dar luogo a una teoria matematica che renda conto dell' influenza del dielettrico nei fenomeni elettrostatici.

O. F. Mossotti, indipendentemente da questo suggerimento, pubblica subito dopo la sua classica memoria (1846). L' ipotesi di una materia costituita da molecole equiparabili a sferette conduttrici sulle quali è un'atmosfera di etere (fluido elettrico positivo, secondo le idee frankliniane) era già stata proposta da Avogadro (1806-1807) e con essa il Mossotti fin dal 1836 cercava di spiegare elettricamente la coesione, l'adesione, la capillarità, fenomeni che anche oggi entrano un pò faticosamente nel gran quadro della teoria elettrica della materia. E si è detto che la stessa ipotesi era stata adottata da Faraday per dare una immagine fisica alla sua *polarizzazione* del dielettrico.

Nel 1846 basta al Mossotti avvertire che tal *polarizzazione* consiste nel condensarsi l'atmosfera etereo-elettrica da una parte della molecola e rarefarsi dall'altra, onde ogni molecola diventa l'analogo elettrico di una calamita (oggi si dice : diventa un *dipolo elettrico*), e tutta la teoria del magnetismo del Poisson viene di colpo trasformata dal Mossotti nella *teoria della polarizzazione dei dielettrici*.

Clausius riprenderà (1866-1867) le stesse ipotesi e gli stessi calcoli del Mossotti procedendo anche lui sulla falsariga di Poisson e sopravanzando notevolmente il Mossotti solo nella seconda edizione del suo lavoro (1879). Lampa (1895), immaginando che le molecole siano paragonabili non a sfere ma ad ellissoidi opportunamente orientati, estenderà la teoria ai dielettrici cristallini. Helmholtz nei suoi classici lavori sulla polarizzazione dei dielettrici (1870-1881) preferirà pensare a dielettrici contenenti le due specie di elettricità che, spostandosi sotto l'effetto del campo elettrico e in proporzione di esso, danno luogo

(1) *Exp. Res.*, XI Ser., n. 1168. « It was in attempts to prove the existence of electricity separate from matter, by giving an indipendent charge of either positive or negative power to some substance, and the utter failure of all such attempts, whatever substance was used or whatever means of exciting or *evolving* electricity were employed, that first drove me to look upon induction as an action of the particles of matter, each having *both* forces developed in it in exactly equal amount. It is this circumstance..., which I am about to adduce in favour of my view, that electric induction is an action of the contiguous particles of the insulating medium or *di-electric* ».

(1) A. De La Rive: *Traité d'électr.*, 1° vol., Paris, 1854, p. 129.

(2) V. p. es. *Exp. Res.*, XIII Ser., n. 1616.

Digitized by Google

alla polarizzazione, indipendentemente da una particolare ipotesi sulla costituzione molecolare. Debye, infine, (1912) applicando ai dielettrici un' ipotesi prospettata fin dal Clausius (1866-1867), supporrà più generalmente che, oltre i dipoli creati dal campo elettrico, preesistano anche dei dipoli sui quali il campo esterno ha una semplice azione orientatrice disturbata dal movimento termico.

Il concetto è sempre quello di Mossotti, e la teoria della polarizzazione dei dielettrici si è facilmente adattata alle successive esigenze delle teorie elettriche, fino alle più moderne sulla costituzione della materia.

Perciò l' idea di Mossotti, di applicare ai dielettrici le considerazioni di Poisson sul magnetismo indotto, deve considerarsi una delle più feconde e delle più solide tra quelle maturate durante il secolo scorso ; non sono quindi inadeguati i numerosi richiami che il Duhem (1), a differenza di molti altri fisici, fa all'opera del nostro.

In questo decennio (1840-1850) la marcia trionfale della *corrente elettrica* che, uscita dai laboratori nelle strade, cominciava a tessere la sua rete di fili nella quale ha ora imprigionato il mondo, non intralciò dunque un parallelo ed imponente sviluppo dell'elettrostatica.

10. - Frutto degli studi elettrostatici dopo la metà del secolo fu un gruppo numeroso di lavori sui dielettrici e sulle loro anomalie ; citerò quelli di Matteucci (1849-1850), di Kohlrausch (1854), di Gaugain (1858-1864) e in particolare il lavoro del Siemens (1864) nel quale venne stabilita l'esistenza di un effetto termico nel dielettrico di un condensatore soggetto a cariche e scariche successive (*effetto Siemens* o *calore di Siemens*) che solo molti anni più tardi, per esclusione delle altre cause e specialmente di un sospettato effetto Joule (Naccari e Bellati, 1882) e per le eleganti esperienze di Arnò (1892-1899) sulla rotazione di un dielettrico in un campo elettrico ruotante, potrà essere giustamente interpretato come un calore di isteresi.

Ma da quel gruppo di lavori non scaturì ancora nessuna conclusione notevole che servisse a discriminare i fenomeni estremamente complessi presentati dai dielettrici reali.

Si devono inoltre registrare : la scoperta del *Strömungsstrom*, cioè di una differenza di potenziale, capace di dare una corrente continua, per effetto del flusso di un liquido (Quincke, 1859-1861 ma già intravisto da A. C. Becquerel, Traité de l'électr., 2° vol. Paris, 1834 p. 94), e la serie dei lavori di Hankel sulla piro-elettricità (1839-1883), contemporanei a una teoria della piroelettricità (W. Thomson, 1860) che può sostenersi tuttora se la piroelettricità si sostiene lei stessa (2). Infine vengono descritte quasi contemporaneamente le due macchine elettrostatiche a induzione di Holtz (1865-1867), la macchina di Töpler (1865), la graziosa quanto inutile macchina di W. Thomson a caduta d'acqua (1867), e il *replenisher* di W, Thomson (1868) piccola variante di apparecchi precedenti che fanno capo al *duplicatore* del Belli.

In questo periodo, affievolitasi poi spentasi l'opera del Faraday, domina per genialità, per eleganza, per ampiezza, il contributo di W. Thomson, ora essenzialmente sperimentale.

Con l' idea dell'*anello di guardia*, poi applicato anche a un ingegnosissimo condensatore piano campione, l'elettrometro a bilancia immaginato dal Volta e usato a sproposito da Snow Harris (1834-1836) diventa il classico *elettrometro assoluto* (1853 e poi modificato fino al 1870). Con questo lo stesso W. Thomson esegue finalmente (1860) la misura della differenza di potenziale di una pila Daniell (la pila campione di allora) in unità assolute elettrostatiche.

Hankel (1850) aveva perfezionato molto abilmente l' elettrometro di Bohnenberger, ma poco dopo il Thomson inventa e perfeziona successivamente 1857-1867) l' *elettrometro a quadranti*, con il quale l' elettrometria passa dalla sensibilità faticosa di un *volt* o poco meno, alla sensibilità ordinaria di 0,001 *volt*. Questo progresso è bensì dovuto al *campo ausiliario*, sicchè il merito primo va a Bohnenberger, e una sensibilità praticamente uguale presenta anche l'elettrometro di Hankel (che ha il vantaggio di essere praticamente aperiodico e di avere capacità minore) ; ma non vi è dubbio che l'elettrometro a quadranti di W. Thomson ha costituito una pietra miliare per l'ulteriore progresso dell'elettrostatica, e non dell'elettrostatica soltanto.

Forse nessun fisico ha dato all'elettrostatica un contributo così vario, così completo, così formativo, come lo ha dato W. Thomson, che dappertutto ha lasciato traccia precisa, profonda, indelebile.

Dalle definizioni matematiche esatte e fisicamente chiare di *potenziale* di un punto, di *differenza di potenziale* tra due punti del campo (1853), di *capacità* di un conduttore (1845-1853) (1) all'essenziale contributo dato ai lavori della British Association (1861-1867) che stabilirono finalmente un sistema razionale di misure elettriche e di campioni corrispondenti ; dai suoi elettrometri all'elettrodo a gocce e al contributo allo studio dell'elettricità atmosferica ; dai vari tipi di condensatori ai due metodi di confronto di capacità (1873) ; dalla esposizione elementare matematica della teoria elettrostatica al più elevato contributo teorico già ricordato, l'opera di Lord Kelvin ha dominato ogni ramo dell'elettrostatica, la quale presenta così, verso il 1870, un aspetto non più sostanzialmente dissimile dall'elettrostatica coulombiana di oggi.

11. - Invano ho cercato nei trattati sull'elettricità che precedono il *Treatise* di Maxwell (2), un indizio

(1) *Leçons sur l'électr. et le magn.*, 2° vol., Paris, 1892 ; *Les théories électriques de J. C. Maxwell*, Paris, 1902.

(2) Sembra infatti (VOIGT, 1890-1898) che i 4/5 almeno della piroelettricità della tormalina si possano attribuire alla piezoelettricità di questo cristallo, e la teoria di Voigt che riconduce la piroelettricità a piezoelettricità, si accorda anche meglio con l'esperienza nel caso del clorato di sodio. V. WINKELMANN : *Hand. der Phys.* 4° vol., Leipzig, 1905, p. 782-783.

(1) Alla definizione di *capacità* era giunto egualmente l'Helmholtz (1847).

(2) J. C. MAXWELL : *A treatise on electricity and magnetism*, Oxford, 1873 ; la seconda edizione, che non pre-

Digitized by Google

della maturità dei tempi a collaborare alla poderosa visione d' insieme che è la caratteristica di quest'opera. Nè le teorie dell'elettrostatica contenute nei libri di Clausius (1859) e di Betti (1865) sulla funzione potenziale, o nel libro del Beer (1865) ; nè le teorie generali dell'elettricità del Clausius (1867) e del Briot (1869), nè i lavori di Ampère, dei Neumann, di Riemann, di W. Thomson, di Weber, possono essere ricordati per diminuire il valore inestimabile di sintesi contenuta nell'opera di Maxwell.

Buona parte del primo dei due volumi di quest'opera è dedicata all' elettrostatica che, per la prima volta, riceve uno sviluppo organico, completo, teorico (su di una larghissima base sperimentale). L'elettrostatica coulombiana vi è intrecciata con una nuova elettrostatica, ove sono poste in particolare le basi concettuali (*spostamento elettrico, corrente di spostamento*, 1862) necessarie per la teoria elettromagnetica che, sviluppata nel secondo volume, è del Maxwell sommo titolo d'onore.

Fondamento della nuova elettrostatica : l'azione elettrica non è un'azione a distanza ; l'azione di Coulomb è la risultante di un'azione molto più complessa che è localizzata nel mezzo dielettrico, sede del campo elettrostatico, L'energia elettrostatica, di posizione, per cui cariche eteronome tendono a precipitarsi una sull'altra, è un'energia distribuita nel mezzo dielettrico, come energia di posizione si immagina distribuita in seno ad un mezzo solido elastico deformato (prima forma dell'elettrostatica di Maxwell, dell'etere elastico–elettrico). Creare un campo elettrostatico significa creare uno *spostamento* dell'etere dalla posizione di riposo e il flusso di etere, che in seguito a questo spostamento attraversa la superficie di un conduttore, ci appare come la carica elettrica di questo (1).

L'elettrizzazione dei conduttori presenti nel campo diventa per Maxwell la manifestazione al contorno di un'alterazione avvenuta in seno al mezzo isolante, così come la deformazione di due dinamometri all'estremità di una corda tesa ci avverte delle particolari condizioni di tensione a cui ogni parte della corda si trova soggetta.

Matematicamente : i fenomeni elettrostatici sono dovuti all'esistenza contemporanea nel dielettrico di due campi vettoriali, dotati di particolari proprietà e tra loro connessi. I due vettori introdotti dal Maxwell sono l'*intensità del campo* $\mathcal{E}$ e lo *spostamento elettrico* δ. In ogni punto del campo è $\delta = \frac{\varepsilon}{4\pi}\mathcal{E}$ ove ε è la costante dielettrica del mezzo. Ogni elemento dv di volume del dielettrico è sede dell'energia elettrostatica

$$\frac{1}{2}\,.\,\delta\,.\,\mathcal{E}\,.\,dv.$$

Le densità elettriche di volume o superficiali presenti nel campo compaiono nella teoria matematica del Maxwell come valori (definiti in grandezza e segno) ottenuti da particolari operazioni matematiche eseguite su quei due vettori (*divergenze di volume* o *divergenze superficiali*), necessari per individuare tali vettori in ogni punto del campo elettrico, ma sforniti di una esistenza fisica reale.

Unica realtà fisica dunque della teoria matematica (2ª forma dell'elettrostatica di Maxwell) è la densità dell'energia $\frac{1}{2}\,.\,\delta\,.\,\mathcal{E}$ in ciascun punto del campo, e il carattere di energia di posizione da attribuirsi ad essa. Cosicchè le condizioni di equilibrio elettrico diventano condizioni di minimo per l'integrale esteso a tutto il campo :

$$\frac{1}{2}\int \delta\,.\,\mathcal{E}\,.\,dv.$$

Le forze ponderomotrici a cui sono soggetti i corpi nel campo elettrico si deducono dalle variazioni di energia prodotte da opportuni spostamenti virtuali dei corpi stessi.

Nella massa dei conduttori, in quanto δ ed $\mathcal{E}$ vi sono ovunque nulli, potrà anche ritenersi inesistente il campo elettrico, cioè le superficie dei conduttori si potranno considerare come parte del contorno del campo (1).

Per mostrare quale contrasto concettuale esista tra l'elettrostatica di Coulomb e quella di Maxwell dirò solo che, ad es., la conservazione dell'elettricità diventa per Maxwell l'incompressibilità dell'etere elastico-elettrico della prima forma della teoria di Maxwell ; diventa la condizione di solenoidalità per il vettore δ nella seconda forma.

Contrasto concettuale, ma l'una e l'altra teoria hanno largamente dimostrato la loro equivalenza a dominare i fatti sperimentali. Sono le parole di Maxwell :

« I was aware that there was supposed to be a difference between Faraday's way of conceiving phenomena and that of the mathematicians, so that neither he nor they were satisfied with each others language. I had also the convinction that this discrepancy did not arise from either party being wrong.....

For instance, Faraday, in his mind's eye, saw lines of force traversing all space where the mathematicians saw centres of force attracting at a distance : Faraday saw a medium where they saw nothing but distance : Faraday sought the seat of the phenomena in real actions going on in the medium, they were satisfied that they had found it in a power of action at a distance impressed on the electric fluids.

---

senta per ciò che mi interessa differenze sostanziali, fu potuta curare dal Maxwell solo nei primissimi capitoli, cioè solo per parte dell'elettrostatica ; a questa parte dell'elettricità egli volse dunque le sue ultime cure.

(1) A bella posta non fisso i segni.

(1) Così almeno ritengono taluni dei seguaci della teoria di Maxwell ; v. p. es. la chiarissima esposizione di A. Gray : *A treatise on magnetism and electricity*. 1° vol., London, 1898, §§ 149, 197. Al contrario, nell'elettrostatica coulombiana si ritiene universalmente che il campo nell'interno dei conduttori sia nullo come risultante di tutte le forze elettrostatiche dovute alle cariche presenti e agenti attraverso la massa del conduttore come attraverso un dielettrico. L'esperienza del pozzo di Faraday, fatta con un materiale semiconduttore, p. es. con una campana di vetro lievemente umida (Pellat) induce a ritenere esatto il punto di vista coulombiano (v. p. es.: H. Bouasse : *Cours de magn. et d'électr.* 3° vol., Paris, 1920, p. 119).

Digitized by Google

When I had translated what I considered to be Faraday's ideas into a mathematical form, I found that in general the results of the two methods coincided, so that the same phenomena were accounted for, and the same laws of action deduced by both methods, but that Faraday's methods ressembled those in which we begin with the whole and arrive at the parts by analysis, while the ordinary mathematical methods where founded on the principle of beginning with the parts and building up the whole by syntesis....

The whole teory, for instance, of the potential, considered as a quantity which satisfies a certain partial differential equation, belongs essentially to the method which I have called that of Faraday. According to the other method, the potential, if it is to be considered at all, must be regarded as the result of a summation of the electrified particles divided each by its distance from a given point » (*Treatise.* 1° vol., p. IX-XI).

Orbene, è subito opportuno stabilire due fatti:

1° Se per *elettrostatica senza azione a distanza* si vuol intendere soltanto l'elettrostatica dedotta dalla teoria del potenziale, cioè dalle equazioni differenziali a cui il potenziale elettrostatico deve soddisfare (1), essa è evidentemente equivalente all'elettrostatica coulombiana, perchè la teoria del potenziale di Green è stata stabilita attribuendo al potenziale le proprietà che a tale funzione spettano deducendole dalla legge di Coulomb.

Il distinguere tra elettrostatica con azione a distanza o senza sarebbe una questione piuttosto formale. Ben più profonda è la differenza tra *elettrostatica senza azione a distanza* ed *elettrostatica di Coulomb*, quando per la prima si intende quella di Maxwell, cioè quando l'energia elettrostatica si intenda localizzata nel mezzo.

2° Con tanta cura Maxwell si sforza ad attribuire a Faraday il merito dell'idea fondamentale della nuova elettrostatica, alla quale Maxwell non avrebbe fatto che dare forma matematica, con altrettanta cura io desidero restituirne a Maxwell l'onore e l'onere completo; e per l'idea e per la forma matematica.

L'elettrostatica di Faraday è l'elettrostatica della conservazione dell'elettricità, del teorema delle superficie corrispondenti (principio dell'induzione, § 8) e della polarizzazione del dielettrico *ponderabile*. Faraday, pur cercando di schivare ogni ipotesi sulla natura dell'*elettricità*, ammette l'esistenza di questa sui conduttori; è evidente lo sforzo che, con grande scapito per la chiarezza, il Faraday compie per non parlare di *cariche di polarizzazione* nei dielettrici soggetti al campo, ma qualche frase qua e là [p. es. *Exp. Res.*, XI Ser., n. 1163: *forces (or electricities)*], lo stesso nome di *di-elettrico* (2), il gruppo di ipotesi raccolte all'inizio della XIV Serie delle *Exp. Res.* (n. 1667-1688) mostrano chiaramente che le idee del Faraday sulla polarizzazione del mezzo *ponderabile* isolante coincidono con quelle del Mossotti, ed al Faraday non ripugna per nulla il pensare a cariche elettriche di polarizzazione nei dielettrici *ponderabili*.

Che se poi il mezzo isolante è il vuoto, ecco quanto scrive il Faraday (n. 1616):

« But assuming that a perfect vacuum were to intervene in the course of the lines of inductive action, it does not follow from this theory, that the particles on opposite side of such a vacuum could not act on each other. Suppose it possible for a positive electrified particle to be in the centre of a vacuum an inch in diameter, nothing in my present views forbids that the particle should act at the distance of half an inch on all the particles forming the inner superficies of the bounding sphere, and with a force consistent with the well known law of the squares of the distance. But suppose the sphere of half an inch were full of insulating matter, the electrified particle would not then, according to my notion, act directly on the distant particles, but on those in immediate association with it, employing *all* its power in polarising them; producing in them negative force equal in amount to its own positive force and directed towards the latter, and positive force of equal amount directed outwards and acting in the same manner upon the layer of particles next in succession. So that ultimately, those particles in the surface of a sphere of half an inch of radius, which were acted on *directly* when that sphere was a vacuum, will now be acted on *indirectly* as respect the central particle or source of action, i. e. they will be polarised in the same way, and with the same amount of force ».

E poi ancora, al n. 1680:

« I think it is evident that in the case stated, action at a distance can only result through an action of the contiguous *conducting* particles. There is no reason why the inductric body should polarise or affect *distant* conductors and leave those *near* it, namely the particles of the dielectric, unaffected: and everything in the form of fact and experiment with conducting masses or particles of a sensible size contradicts such a supposition ».

Certo nella prima lettera di Hare (1) si trova già attribuito a Faraday il proposito rivoluzionario di negare l'azione a distanza e gli si chiedono spiegazioni sulla contraddizione tra una tale idea e quella espressa nel n. 1616. Ma nè questa nè la seconda lettera di Hare (2), in cui questi ripete ancora il suo preciso quesito a Faraday sull'esistenza o meno di un'azione a distanza nel vuoto indussero Faraday a negare esplicitamente l'azione a distanza. Tutt'altro;

(1) MAXWELL: *Treatise.* 1° vol., § 95, p. 98; DRUDE: *Physik des Aethers*, Stuttgart, 1894, p. 10; PELLAT: *Cours d'élctr.*, 1° vol., Paris. 1901, p. 71.

(2) *Exp. Res.*, XI Ser., n. 1168. « It was in attempts to prove the existence of electricity separate from matter, by giving an indipendent charge of either positive or negative power to some substance, and the utter failure of all such attempts, whatever substance was used or whatever means of exciting or *evolving* electricity were employed, that first drove me to look upon induction as an action of the particles of matter, each having *both* forces developed in it in exactly equal amount. It is this circumstance..., which I am about to adduce in favour of my niew, that electric induction is an action of the contiguous particles of the insulating medium or *di-electric* ».

(1) *Am. Journ. of Sc.*, 38, p. 1, 1840.

(2) *Am. Journ. of Sc.*, 41, p. 1, 1841.

Digitized by Google

ecco il § XX della risposta di Faraday ad Hare (1): « I believe *ordinary induction* in all cases to be an action of *contiguous* particles; and.... assuming a very hypothetical case, that of a vacuum, I have said nothing in my theory which forbids that a charged particle in the center of a vacuum should act on the particles next to it, though that should be half an inch off. With the meaning which I have carefully attached to the word contiguous (XVI) (2), I see no contradiction here in the terms used, nor any natural impossibility, or improbability in such an action. Nevertheless, all *ordinary* induction is to me an action of contiguous particles, being particles at insensible [?] distances; induction across a vacuum is not an ordinary instance, and yet I do not perceive that it cannot come under the same principle of action ».

Pare che più precisa risposta alle lettere di Hare il Faraday abbia voluto dare con la lettera al *Caro Phillips* (3) contenente in pochissimi periodi il gruppo meraviglioso di esperienze sull'induzione totale e sullo schermo elettrico, che costituiscono le esperienze classiche dette del *pozzo di Faraday*. In questa lettera io vedo precisata dal Faraday l'analogia tra dielettrico ponderabile e ammasso di particelle (molecole, v. n. 1688) conduttrici alla Mossotti. Ma la negazione dell'azione a distanza nel vuoto non ce la vedo.

Lasciamo che Faraday maturi le sue idee per più di un decennio. Nella lettera a Riess (1856) Faraday stabilisce ancora una volta che l'azione tra corpi elettrizzati si esercita attraverso le particelle contigue del mezzo isolante, solo in quanto tale mezzo è ponderabile; e alla questione postagli nuovamente dal Riess (4) se Faraday ammetta o no un'azione a distanza nel vuoto, Faraday non trova di meglio che confermare le sue vedute precedenti rimandando al n. 1616 e alla lettera a Hare (5).

Verrà la luce dall'ultima parola sull'induzione elettrostatica detta dal Faraday? (6).

(1) *Am. Journ. of Sc.*, 39, p. 113, 1840.

(2) Ivi Faraday spiega che *contiguous* non vuol dire che manchi spazio tra le successive particelle, tanto più che ciascuna va intesa come conduttrice ma incapace di comunicare elettricità alla successiva. Ogni particella ha per *contiguous* la particella immediatamente prossima, qualunque ne sia la distanza, anche molto grande.

(3) *Phil. Mag.*, 22, p. 200, 1843.

(4) *Phil. Mag.*, 11, p. 10-11, 1856; in particolare: « I agree entirely with You that such an action [a distanza] is extremely difficult to conceive; but admit we not the like in the great theory of gravitation? And admit You not also this action in an extraordinary case of induction in electricity? »

(5) *Phil. Mag.*, 11, p. 2, 1856. « Faraday has endeavoured to establish the notion that induction is not produced by the action of electricity across space, but that an electric body acts *only* on the contiguous particles of an insulating medium ecc. ». If You refer again to my papers, You will find that in the very beginning of that on induction (n. 1165). I have especially limited the cases to those of *ordinary induction, i. e.* cases when matter is present; at n. 1215 this expression is repeated; and again in Vol. 2° *Exp. Res.*, p. 267. Instead of saying that induction cannot occur across space, I have especially spoken of the case of a vacuum (1613, 1616), which case is enlarged upon in a letter to Dr. Hare ».

(6) *Proc. Roy. Inst.*, 2, p. 470, 1858.

No. Anche in quest'ultimo lavoro, Faraday si limita a ribadire le sue idee sulla polarizzazione dei mezzi isolanti [ponderabili!] costituiti secondo le idee di Mossotti, constatando che le sue idee in merito, esposte da più di venti anni, non sono state contradette da nessun fatto sperimentale.

Ma è dunque una favola questa azione del mezzo (in contrapposto all'azione a distanza) attribuita a Faraday fin dal Maxwell?

Premesso che ho trovato spesso difficile comprendere il significato concettuale delle pagine di Faraday sicchè ad es. la fine del § XX della risposta ad Hare potrebbe anche alludere a una polarizzazione del vuoto, io non credo che possano essere portati in appoggio delle idee attribuite a Faraday i famosi nn. 1224, 1297 nei quali vengono introdotte le tensioni longitudinali e le compressioni laterali delle linee di forza, costituenti la caratteristica essenziale della teoria detta di Faraday-Maxwell. Infatti pensando alla necessaria azione elettrica tra le successive molecole [ponderabili] polarizzate e ordinate lungo una linea di forza, e pensando all'analogia che il Faraday trova tra le successive pareti metalliche usate nelle esperienze sul pozzo di Faraday (v. la lettera al *Caro Phillips*) e i vari strati di particelle conduttrici costituenti un dielettrico [ponderabile], io sono indotto a presumere che queste tensioni e pressioni fossero piuttosto dal Faraday pensate come la risultante dell'azione coulombiana di attrazione tra le cariche eteronome contigue lungo una stessa linea di forza, e di repulsione tra le cariche omonime affiancate. La stessa analogia fa comprendere il significato da attribuire alle parole *all, equal, indirectly, only*, dei citati nn. 1616, 1680, quando appunto si tengano presenti le proprietà dell'induzione totale.

Restano i due lavori, certamente più caratteristici, sulla natura delle linee di forza (1). Nel primo di questi si legge:

n. 3258 « But.... which constitutes polarity.... in the case of an indipendent bar-magnet situated in free space?.... I cannot conceive curved lines of force without the condition of a physical exixtence in that intermediate space. If they exixt, it is not by a succession of particles, as in the case of static induction (nn. 1215, 1231) [nei mezzi ponderabili], but by condition of space free from such material particles ».

n. 3263 « .... To acknowledge the action in curved lines, seems to me to imply at once that the lines have a physical existence. It may be a vibration of the hypothetical aether, or a state or tension of that aether.... ».

n. 3277 « I conceive that when a magnet is in free space, there is such a medium (magnetically speaking) around it.... What that outer magnetic medium, deprived of all material substance, may be, I cannot tell, perhaps the aether. I incline to consider this surrounding or outer medium as *essential* to the magnet; that it is that which relates the external polarities to each other by curved lines of power... ».

(1) *Phil. Mag.* 3; p. 401, 1852; *Proc. Roy. Inst.*, 11 giugno 1852.

Digitized by Google

E nel secondo di questi lavori (ultimo capoverso) Faraday rinnova il suo circospetto appello all'etere perchè gli riempia il vuoto e si assuma la responsabilità della curvatura delle linee di forza magnetica.

Ecco dunque apparire, per la trasmissione dell'azione magnetica nel vuoto, questo mezzo ipotetico, l'*etere*; mentre ancora il Faraday è pieno di riserve sul caso delle azioni elettrostatiche.

Ma, poichè Faraday (in quest'ultimo lavoro) classifica l'azione elettrica insieme con l'azione magnetica come un'azione non a distanza; poichè l'affinità riscontrata nei due gruppi di fenomeni, elettrostatici e magnetostatici, andò sempre più rafforzandosi (1), i fisici furono indotti ad attribuire a Faraday alcune idee sulle azioni elettrostatiche nel vuoto, che per venti anni egli evitò di sostenere.

L'inaspettata conclusione alla quale io mi trovo condotto è che l'elettrostatica di Faraday è l'elettrostatica coulombiana, completata con l'idea, ulteriormente sviluppata da Mossotti, Clausius, Helmholtz, Debye, della polarizzazione del dielettrico ponderabile, e con tanto di azione a distanza che per Faraday è concepibilissima per la gravitazione come per l'azione elettrica (2).

E se Faraday si fosse convinto per un momento che la semplice azione coulombiana dà ragione delle linee di forza curve nel vuoto, con quanto piacere avrebbe fatto a meno di quell'ipotetico etere dal quale con tanta titubanza chiede aiuto (nn. 3263, 3277)!

Perchè, infatti, è estremamente curioso notare che tutta l'opera di Faraday relativa all'azione del mezzo, e che culminò con la scoperta e la misura della *capacità induttiva specifica* in elettrostatica, e del *para-* e *dia-magnetismo*, in magnetostatica, deriva da un presupposto errato: le linee di forza sono curve, dunque il mezzo deve prendere parte attiva alla propagazione dell'azione elettrica (3). (Si sa bene che la pura azione coulombiana a distanza interpreta senz'altro linee di forza curve).

Pochi esempi conosco di un impulso così meraviglioso dato alla fisica in conseguenza di una premessa infondata; di così buoni frutti maturati da una così mala radice.

Più che nei lavori di Faraday è forse in taluni lavori di W. Thomson che trovasi il germe dell'elettrostatica di Maxwell (4), e specialmente in quello in cui Thomson (5), anch'esso sotto l'impulso delle idee di Faraday sull'induzione, mostra che ad ogni problema di elettrostatica corrisponde un problema di equilibrio di un solido elastico, risultato al quale W. Thomson, però, non dà che valore di utile analogia matematica (6).

(1) P. es. anche le linee di forza elettriche nel vuoto esistono e sono curve?!

(2) *Phil. Mag.*, 3, p. 401, 1852, n. 3245; e analogamente nella lettera di Riess, *Phil. Mag.*, 11, p. 10, 1856, v. nota (5) di pag. 26 di questo lavoro.

(3) N. 1166 della XI Serie, 1837-1838, e poi più volte ripetuto in seguito fino agli ultimi lavori, p. es. nn. 3258, 3263, 3277, già citati, *Phil. Mag.*, 3, p. 401, 1852.

(4) Per es. «*On the uniform motion of heat in homogeneous solid bodies and its connection with the mathematical theory of electricity* », *Camb. math, Journ.*,1842.

(5) *Camb. and Dubl. math. Journ.*, 1847.

(6) Vedi anche *Nat.*, 38, p. 571, nota 5ª, 1888.

12. - Torniamo all'elettrostatica di Maxwell.

La seconda forma dell'elettrostatica di Maxwell, colle lievi modificazioni di Hertz (1), è un edifizio logico, esempio caratteristico di fisica matematica, fondata sul metodo puramente deduttivo, ed oggi perfettamente accettabile perchè capace di governare la grande massa dei fatti sperimentali conosciuti.

Ma la prima forma dell'elettrostatica di Maxwell, quella dell'etere elastico-elettrico, non è sostenibile.

Quanto gravi e insanabili contraddizioni siano celate tra le varie parti di questa elettrostatica è detto in un lavoro di Duhem (2), ove l'elettrostatica di Maxwell vi è analizzata profondamente e sul quale ritorneremo.

L'aver immaginato un etere elettrico, cioè costituito di elettricità, ha condotto Maxwell a una curiosa contraddizione: si immaginino i due piatti A, B di un condensatore carico; A sia carico positivamente; B sarà carico negativamente. Secondo Maxwell lo spostamento dell'etere elastico-elettrico che dà luogo alle ordinarie cariche coulombiane che si manifestano su A e su B, è avvenuto nel dielettrico nel senso $A \to B$, cioè lo spostamento è concorde col campo elettrico; quindi, per giustificare il segno delle cariche che appaiono negative su B e positive su A, si deve pensare che una carica negativa su di un conduttore indichi l'arrivo di etere elettrico spostato. In altri termini lo spostamento dell'etere nel senso $A \to B$ equivale a uno spostamento di elettricità negativa nel dielettrico nel senso $A \to B$. L'etere va dunque immaginato come un fluido incompressibile formato di elettricità negativa.

Al contrario, in tutti i calcoli e considerazioni del Maxwell (3), l'etere elettrico, che si sposta per effetto del campo in senso concorde con questo, è etere fatto di elettricità positiva.

Non si tratta di un semplice sbaglio di segno, ma di una contraddizione in termini di natura ben più profonda, a togliere la quale bisogna supporre che Maxwell immaginasse nell'etere due specie di elettricità, l'una causante le cariche sui conduttori, l'altra causante lo spostamento nel dielettrico! (4).

La ragione di tale incongruenza che mina alle fondamenta tutta l'elettrostatica di Maxwell (1ª forma) è, a mio parere, la seguente: necessità di negare le cariche coulombiane distribuite alla superficie dei conduttori presenti nel campo ma presentarle come conseguenza dell'alterazione (polarizzazione) del dielettrico (sia pure il vuoto), che dà luogo ai fenomeni elettrostatici (5); necessità di giustificare material-

(1) Più specialmente l'introduzione del vettore $\mathcal{D} = \varepsilon \mathcal{E} = 4\pi\delta$ (1890), da Hertz chiamato *polarizzazione elettrica*, e ora più spesso chiamato *induzione elettrica*.

(2) *Les théories électriques de J. C. Maxwell*, Paris, 1902.

(3) P. es. il ragionamento a p. 61 del *Treatise* per determinare la relazione tra il flusso del vettore *spostamento* uscente da una superficie chiusa, e la carica coulombiana che vi si contiene; lo stesso ragionamento serve al Maxwell per giustificare l'espressione dell'energia localizzata nel mezzo; e ancora la spiegazione a p. 64; e poi, fondamentale, la giustificazione delle famose *correnti di spostamento*.

(4) V. p. es. J. H. JEANS: *The mathematical theory of electricity and magnetism*, 5ª ed., Cambridge, 1925, p. 155.

(5) Già Avogadro (1806-1807) era stato indotto dalle proprietà del *quadro di Franklin* a localizzare nel mezzo isolante la causa dei fenomeni elettrici e delle cariche che

Digitized by Google

mente le *correnti di spostamento* che rappresentavano la chiave di volta della teoria elettromagnetica, e contro le quali giustamente previde il Maxwell che si sarebbero rivolte le critiche alla sua opera.

Per le proprietà elastiche dell'etere maxwelliano, le incongruenze sono meno palesi, ma riconosciute da tempo (1), in seguito ai lavori di Beltrami (1884-1886), Mathieu (1886), Brillouin (1887) : il sistema di deformazioni dell'etere supposto da Maxwell non rientra nelle leggi generali dell'elasticità. Ad una conclusione analoga giunge recentemente Megh Nad Saha (1917): il sistema di sforzi immaginati da Maxwell nel suo etere non conduce all'espressione dell'energia elettrostatica del sistema, supposta da Maxwell e conforme all'esperienza, quando il mezzo si consideri soggetto alle ordinarie leggi dell'elasticità (2).

D'altra parte apparve al Maxwell come necessità assoluta per dar valore fisico alla sua teoria della localizzazione dell'energia e farla dai fisici accettare, il riempire il vuoto di qualcosa di quasi materiale, che potesse pensarsi supporto di quell'energia, e che aiutasse la concezione della propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto. L'ultimo capitolo del suo *Treatise* e in particolare i §§ 865, 866 sono caratteristici.

In questo attaccamento all'etere, a questo mezzo ipotetico ma quasi materiale, io trovo la più notevole incongruenza del genio di Maxwell: l'uomo che avrebbe potuto negare ogni consistenza all'etere perchè pel primo intuiva l'esistenza di onde *non elastiche* propagantisi nel vuoto, che, svincolando la teoria ondulatoria della luce dalle ipotesi elastiche delle teorie di Fresnel e di F. Neumann (e in certo senso conglobandole) la liberava di per sè dalla schiavitù al mezzo quasi materiale necessario per le teorie elastiche, non seppe o non osò liberare le sue onde, non più elastiche, dalla servitù di quello stesso etere.

Lo vediamo a sua volta inchinarsi al despota ipotetico e ignoto, contro la cui esistenza avrebbe potuto sferrare il colpo più grave, e farsene un nuovo idolo, e farsene il tallone di Achille ove si troverà colpito dalla nuova ottica dei corpi in moto ; questa e la *teoria dei quanta* non si limiteranno a discutere sul valore dell'elettrostatica di Maxwell, ma ne intaccheranno l'opera somma nella sua parte più bella : la propagazione delle onde elettromagnetiche.

Disconosciuta, poi esaltata oltre ogni limite, oggi si ripete ancora sull'opera di Maxwell il motto scelto da Boltzmann (3) :

« War es ein Gott, der diese Zeichen schrieb »

ma terminandolo con un punto interrogativo di incredulità.

Le riserve che oggi siamo costretti a fare sull'opera di Maxwell, non devono far dimenticare lo sviluppo e il progresso scientifico compiuti nell'ultimo cinquantennio sotto l'impulso di quella.

D'altronde, tolte le poche pagine non fortunate nelle quali il Maxwell ha cercato di dare una ragione fisica a quelli che piuttosto avrebbe dovuto considerare come postulati della sua teoria (e ciò avviene nella seconda forma dell'elettrostatica di Maxwell, tuttora in pieno valore), i tredici capitoli della sua elettrostatica formano un mirabile edifizio e da essi si attinge largamente anche nei trattati recentissimi di elettrostatica.

Così ad es., la teoria degli elettrometri, delle varie forme del piano di prova, dei sistemi di conduttori; la raccolta dei casi risolubili del problema generale dell'elettrostatica.... conservano oggi tutta la freschezza di allora.

13. - Ancor per molti anni fu viva la diffidenza verso le idee di Maxwell, anche nella loro parte essenziale, che non risente degli errori formali e degli strappi alla logica a questo fisico rimproverati. Basti citare quanto diceva W. Thomson nel momento in cui si annunziava al mondo il risultato delle esperienze di Hertz (1887-1888) :

« Maxwell's equations.... cannot be right.... ; being, as seems (?) to me, vitiated for complete circuits, by the curious and ingenious, but, as seems to me, not wholly tenable, hypothesis which he introduces, in § 610 [quella delle correnti di spostamento] for incomplete circuits » (1).

Basti aver presente il giudizio severo fino ad essere inequanime che, in pieno trionfo della teoria maxwelliana, ne dava il Duhem (1902) (2).

Eppure già contemporaneamente al trattato di Maxwell, l'elettrostatica, grazie ai lavori di Boltzmann (1872-1874) vedeva completare la collana di fatti sperimentali previsti dal Faraday per le proprietà dei dielettrici perfetti nei vari stati di aggregazione: veniva stabilita la diseguaglianza dei valori di ε nelle varie direzioni dei cristalli anisotropi e la dipendenza di ε dalla natura del gas ; l'uno e l'altro fatto servirono di valido appoggio alla nascente teoria di Maxwell, ma si dovette giungere fino ai lavori sperimentali e teorici di Hertz (1887-1890) perchè la teoria di Maxwell iniziasse la sua marcia trionfale.

Essenzialmente al binomio Boltzmann-Hertz spetta il merito di aver imposto la teoria di Maxwell, appoggiandola sperimentalmente e teoricamente. Oltre le citate esperienze sulle costanti dielettriche, Boltzmann va ricordato per le sue *Vorlesungen über Maxwells Theorie der Elektricität und des Lichtes* (1891-1893). In queste :

..... « il a tenté un prodigeux effort pour oublier les doctrines que nous enseignent la tradition et l'usage, et pour construire, au moyen de conceptions toutes nouvelles, un système où les équations de Maxwell soient logiquement enchaînées (3) ».

---

si manifestano sulle due armature metalliche. Quando le due armature, mediante un artifizio qualunque (macchina elettrica), presentano una differenza di potenziale, e quindi cariche opposte, Avogadro immagina ingegnosamente che le due armature abbiano acquistato una affinità speciale ciascuna per una delle due elettricità opposte, costituenti ogni mezzo isolante.

(1) P. DUHEM : *Leçons sur l'électricité ecc.*, 2° vol., p. 456 e segg. ; H. BOUASSE : *Cours de Magnétisme et d'électr.*, 2° vol., Paris, 1920, p. 145.

(2) Del resto, mediante opportune modificazioni, la teoria maxwelliana dell'etere elastico può essere messa in accordo con la teoria dell'elasticità (Somigliana ; 1907, 1910).

(3) *Vorlesungen ü. Maxwells Theorie der Elektricität und des Lichtes*, Leipzig, 1891-1893, motto al secondo volume.

(1) *Nat.*, 38, p. 500 e 569-571, 1888.

(2) *Les théories électriques de J. C. Maxwell*, Paris 1902.

(3) DUHEM : *Les théories de J. C. Maxwell*, Paris, 1902, p. 224.

Digitized by Google

Oltre che per le classiche esperienze sulle onde elettromagnetiche, Hertz deve essere ricordato per la forma che ha dato alla teoria maxwelliana (in particolare, poi, per il tentativo di estensione di questa ai corpi in moto). La sua celebre frase: «die Maxwellsche Theorie ist das System der Maxwellschen Gleichungen» (1), pone nei suoi veri termini la questione del valore di una teoria; questa frase vuole stabilire che l'opera di Maxwell è ammirevole, perchè le equazioni di Maxwell governano un enorme numero di fatti sperimentali.

Di più, l'introduzione proposta da Hertz (1890) e oggi quasi generalmente adottata del vettore $\mathcal{D} = \varepsilon . \mathcal{E}$ *induzione elettrica*, analogo al vettore $\mathcal{B} = \mu . \mathcal{H}$ *induzione magnetica*, ha permesso alla teoria di Maxwell di svincolarsi dal vettore *spostamento* $\delta = \frac{\varepsilon}{4\pi} \mathcal{E}$ il cui nome lo manifesta troppo compromesso con la discutibile teoria dell'etere elastico-elettrico.

Un ulteriore passo a questo stesso scopo fu compiuto poco più tardi con la coraggiosa asserzione (2) della inesistenza dell'etere come mezzo quasi ponderabile:

«Es ist gut sich zu vergegenwärtigen, dass sowohl der Begriff des geometriscen Raumes wie auch der Begriff des elektromagnetischen Aethers nur abstractionen sind ..... Wir verbinden mit dem Worte *Aether* keineswegs die Vorstellung einer hypothetischen Substanz; vielmehr gebrauchen wir dieses historisch überlieferte Wort heute als Abkürzung, wenn wir ohne Weitschweifigkeiten von dem Raume als Träger eines elektromagnetischen Feldes sprechen (3)».

Insomma si ammette la proprietà dell'energia elettromagnetica di potersi localizzare nel vuoto e di propagarvisi con la velocità $c = 3.10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$.

Di fronte a concezioni così ampie e comprensive, l'elettrostatica, come scienza a sè, scompare; la teoria dell'elettrostatica è contenuta come caso particolare nelle equazioni di Maxwell, quando si annullino l'intensità della corrente elettrica e le derivate rispetto al tempo dei vettori elettrici e magnetici.

14. - Ancor per molti anni fu viva la diffidenza verso le idee di Maxwell. Ma quando occorse ai fisici di prendere posizione precisa rispetto a questa nuova concezione dei fenomeni elettrici, l'urto di idee assunse una vivacità inusitata.

A rendere accettabile e a divulgare la non facile teoria di Maxwell, occorrevano o gli argomenti sperimentali di un Boltzmann, di un Hertz, o le abilità di esposizione di un Helmholtz (4).

Non si convincono gli avversari con le escandescenze contro gli scettici verso Maxwell, contro i matematici puri, contro Euclide, quel «criminale» di Cavendish, la «Salvation Army» e..... l'alfabeto greco, e con una esposizione della teoria di Maxwell dove *flusso* significa due cose diverse (1). Che si direbbe di un libro di meccanica dove si chiamasse «spazio» anche la «velocità», e come aiuterebbe a comprenderne le leggi?

Non si aiuta Maxwell con le assicurazioni ieratiche sul valore negativo della teoria del potenziale e sulla «proprietà riservata» per le *stresses* di Maxwell di avere esistenza reale, mentre le forze coulombiane non l'hanno (1), asserzioni che vedo ripetute altrove con l'aggiunta altrettanto gratuita che la teoria maxwelliana è più in accordo con i fenomeni elettrostatici di quanto lo sia la teoria coulombiana (2).

Nè con gli stessi metodi si favorisce la teoria coulombiana.

Questa venne grandemente rinvigorita dall'opera di Helmholtz, che, in due lavori fondamentali (1870, e specialmente 1881), indipendentemente da alcuna ipotesi particolare sulla costituzione molecolare ed elettrica della materia, ha dato uno sviluppo completo alla teoria della polarizzazione del dielettrico, mostrando come, sulle basi della teoria coulombiana, si possa financo giungere, migliorandole, ad alcune conclusioni che sembravano esclusivo privilegio della teoria di Maxwell (p. es. quelle sui sistemi di sforzi esistenti in seno a un dielettrico per effetto di un campo elettrostatico). Con queste memorie di Helmholtz si può dire conclusa, fino ai nostri giorni, l'elettrostatica nelle sue grandi linee teoriche.

E non si sminuisce il valore di Maxwell, a vantaggio della teoria coulombiana con la critica minuziosa all'elettrostatica, diluita per metà di un libro (3) e tutta imperniata in fin dei conti sulla incompletezza dei lavori del Maxwell antecedenti al *Treatise*, e sull'errore di segno al quale abbiamo già accennato; incompletezza ed errore originati, a me pare, sempre dalla stessa causa già esposta: il voler a tutti i costi ignorare una elettricità esistente nei conduttori e distribuentesi alla loro superficie nel caso dell'equilibrio. E che dire delle punzecchiature alla simpatia di Maxwell per le analogie fisiche (loc. cit., p. 54), agli errori anche solo di stampa dei lavori di quello (loc. cit., p. 62 in nota), al modo con cui Maxwell assolse il compito prefissosi (loc. cit., p. 183-184); del rimprovero fattogli (loc. cit., p. 83) perchè ai corpi elettrizzati (i conduttori) Maxwell attribuisce la stessa costante dielettrica del mezzo che li separa, rimprovero che deve farsi ugualmente a quasi tutte le esposizioni dell'elettrostatica coulombiana, e che ne vizia completamente il valore logico?

E allorquando Duhem deve pur concludere che, per virtù di Boltzmann, l'opera di Maxwell assume

(1) *Ges. Werke*, 2° vol., p. 23, 1891.

(2) P. DRUDE: *Physik des Aethers*, Stuttgart, 1894, p. 9; *Lehrbuch der Optik*, 1° ed., Leipzig, 1900, p. 420; M. ABRAHAM: *Theorie der Elektrizität*, 2° ed., 1° vol., Leipzig, 1904, p. 142.

(3) M. ABRAHAM: *Theorie der Elektrizität*, 1° vol., 6ª ed., Leipzig, 1921, p. 107.

(4) La morte immatura del nostro Galileo Ferraris ci ha forse privati di una tale esposizione della teoria di Maxwell che andava evidentemente maturando (v. *Opere di G. Ferraris*, 1° vol., Hoepli, 1902, p. 355), e che già appare nelle limpide *Lezioni sui principî scientifici dell'elettrotecnica*, Torino, 1899.

(1) O. H. HEAVISIDE: *Electromagnetic theory*, 1° vol., 1893, passim.

(2) A. GRAY: *A treatise on magnetism and electricity*, 1° vol., London, 1898, p. 102.

(3) P. DUHEM: *Les théories électr. ecc.*, Paris, 1902.

Digitized by Google

il carattere di un edifizio del tutto coerente, egli tenta ancora un :

« l'électrostatique de M. L. Boltzmann n'est autre chose que la troisième électrostatique de Maxwell ; comme cette dernière, elle ne paraît point s'accorder avec les actions que les conducteurs électrisés exercent sur les diélectriques ». (loc. cit., p. 224 e anche p. 132) ».

Ora è ben noto che le azioni ponderomotrici a cui si trova soggetto un dielettrico in campo elettrico, in particolare il succhiamento del dielettrico (Boltzmann, 1873 ; Pellat, 1895) si accordano ugualmente con la teoria Maxwelliana (1) e con quella coulombiana.

Forse a Maxwell mancò il tempo, o (perchè non dirlo ?) la capacità a completare l'opera immane a cui aveva dato vita. Gli si potrà fare un torto di questo, mentre due generazioni di fisici hanno lavorato a completarla e non vi sono riusciti ?

Duhem rimprovera (loc. cit., p. 12) a Maxwell di essere stato della propria opera più avvocato che giudice ! Più grave rimprovero tocca al Duhem : più che giudice, egli fu avvocato implacabile contro la teoria di Maxwell.

15. - Dopo Maxwell, la tecnica sperimentale si affina ancora, agevolando la scoperta di nuovi fenomeni sia pure collaterali, e che si innestano sul vecchio tronco senza vantaggio deciso per l'una o l'altra delle teorie in lotta : coulombiana e maxwelliana.

La tecnica elettrometrica progredisce ulteriormente.

Malgrado l'esempio di Faraday e le pungenti parole di W. Thomson (2), è solo del 1876 (Beetz) il primo elettrometro fornito permanentemente di uno schermo metallico posto a terra per realizzare il duplice vantaggio di riparare l'apparecchio dalle perturbazioni elettrostatiche e fissare più precisamente il valore del potenziale di riferimento.

Le sospensioni in filo di quarzo (Boys, 1887-1889) si sostituiscono con vantaggio sensibilissimo alle vecchie sospensioni di filo di bozzolo e di metallo ; la foglia di alluminio (Kolbe, 1888), malgrado quel suo piegarsi a scatti (il cosiddetto *cri-cri*), si sostituisce prepotentemente alla foglia d'oro ; fa la sua comparsa l'elettrometro assoluto cilindrico (Bichat e Blondlot, 1886). L'elettrometro senza campo ausiliario diventa l'elettrometro a foglie di Exner (1887), *bifilare* di Wulf (1907), ad ago di Szilard (1913-1924), e, dopo varianti innumerevoli, l'elettrometro a campo ausiliario diventa il *tilted electroscope* di Wilson (1903), l'elettrometro a quadranti di Dolezalek (1901) e dei Compton (1919), l'elegantissimo e comodo elettrometro a quadranti di Lindemann e Keeley (1924) ; l'elettrometro tipo Hankel si rinnova a sua volta (Edelmann, 1906 ; Elster e Geitel, 1909 ; Lutz, 1923 ; Perucca, 1927).

Non provo nemmeno a far cenno agli innumerevoli metodi escogitati per la misura di capacità e costanti dielettriche, metodi ormai esclusivamente dinamici, cioè basati sull'uso di forze elettromotrici alternate, giungendo fino a usufruire delle alte frequenze (Drude, 1895). Questi metodi si sono recentemente moltiplicati con l' avvento dell' audion come nuovo mezzo a disposizione della tecnica sperimentale (1). Ormai si può dire che l'unico gruppo di sostanze su cui non si possono fare misure di costante dielettrica, sono le sostanze molto conduttrici, ed è sensibile lo sforzo, talvolta molto indiretto (p. es. Sanford, 1916) che si fa per vincere tale ostacolo (Fürth, 1924-1925) (2).

Le macchine elettrostatiche si inchinarono con rispetto ad una nuova venuta (Wimshurst, 1884-1891), e tutte furono costrette a cedere il posto d'onore alla nuova macchina di Wommelsdorff (1902-1907) che della Wimshurst e delle Holtz-Töpler riunisce i pregi. Questa nuova macchina ha anche tentato le applicazioni pratiche, capace come è di dare fin quattro milliampères e 200.000 volts ; essa è stata proposta per l'alimentazione dei tubi Röntgen per radioterapia, ma ha avuto finora poca fortuna di fronte al trasformatore per alta tensione, con raddrizzatore e con uno dei numerosi artifizi recentemente descritti per correggere la caratteristica pulsante della corrente erogata ; e di fronte alle batterie di accumulatori per alta tensione, preziose e insostituibili nelle esperienze di precisione.

È larga messe raccolse l'elettrostatica di nuovi fenomeni dovuti al campo elettrico o generatori di campo elettrico.

Si deve registrare la scoperta della birifrangenza dei dielettrici ponderabili per effetto del campo elettrico (Kerr, 1875-1885) (3). Si devono registrare le ricerche su di un fenomeno, già altra volta osservato (Fontana, anteriormente al 1776 ; Volpicelli, 1856 ; Govi, 1866) ma venuto in onore dopo i lavori di Duter (1878-1879), di Righi (1879) (4), di Quincke (1880-1883), fenomeno consistente nella variazione delle dimensioni di un isolante soggetto a un campo elettrico e a cui fu dato (Lorberg, 1884) il nome di *elettrostrizione*.

(1) Sia pur completata col termine di Helmholtz (1881) ; v. p. es. JEANS, loc. cit, §§ 199, 202.

(2) *Reprint of papers on electrost. and magn.*, London, 1872, § 342, p. 260.

(1) V. p. es. L. GRAETZ : *Hand. der Elektr. und des Magn.*, 1° vol., Leipzig, 1914, p. 178 ; O. BLÜH, *Phys. ZS.*, 27, p. 226, 1926.

(2) A questo proposito è opportuno chiarire, poichè in pochi libri è fatto, che è solo una comoda regola di calcolo quella di equiparare i conduttori a dielettrico con costante dielettrica $\varepsilon = \infty$. Ciò del resto vale solo per il *campo esterno* a tali conduttori. Non è assolutamente più lecita tale supposizione quando si cosideri l'interno del conduttore. Un dielettrico con $\varepsilon = \infty$, posto in campo elettrico, si polarizza ; il vettore *induzione elettrica* $\mathcal{D}$ nell'interno di un tal dielettrico è di regola non nullo ; un tal dielettrico polarizzato dà luogo all'analogo elettrico dell'esperienza della calamita spezzata : per ogni pezzo del diclettrico è nulla la somma algebrica delle cariche che vi si manifestano alla superficie per effetto della precedente polarizzazione.

Al contrario nell'interno di un conduttore è $\mathcal{D} = 0$, e se il conduttore, inizialmente allo stato neutro e posto in campo elettrostatico, viene diviso in due parti, si realizza la ben nota separazione per induzione elettrostatica delle cariche eteronome.

(3) V. il bel sunto storico che precede il lavoro di L. CHAUMONT : *An. de Phys.*, 4, p. 61, 1915.

(4) Il contributo sperimentale italiano è in questo campo particolarmente notevole (Cantone, 1888 ; Oddone, 1890 ; Corbino, 1896 ; Ercolini, 1898 ;.....).

Digitized by Google

È curioso notare che nè l'effetto Kerr, nè l'elettrostrizione devono la loro vita alla teoria di Maxwell; e solo un'analisi superficiale, che però vedo anche in libri recenti (1), può indurre a presentare tali fenomeni, che sono prova dell'esistenza di un sistema di sforzi nei dielettrici *ponderabili*, come prova della teoria di Maxwell delle tensioni dell'etere. Helmholtz, nell'importante lavoro già citato (1881), mostra come una teoria soddisfacente dell'elettrostrizione possa dedursi dalla teoria coulombiana della polarizzazione del dielettrico ponderabile. Al contrario, tra la teoria maxwelliana in cui si dichiara che le tensioni di Maxwell non spiegano l'elettrostrizione (2), quella che la fa derivare direttamente dalle tensioni di Maxwell (3), e quella che considera l'elettrostrizione come la conseguenza del sistema di sforzi a cui la *superficie* del dielettrico si trova soggetta (4), io concludo con l'altro motto del trattato di Boltzmann:

« So soll ich denn mit saurem Schweiss
Auch lehren, was ich selbst nicht weiss ».

Analogamente per l'effetto Kerr.

Quasi contemporaneamente ai lavori di Kerr e di Duter, i fratelli J. e P. Curie (1880) scoprono il fenomeno di separazione delle cariche elettriche quando cristalli mancanti di particolari elementi di simmetria vengano assoggettati a un opportuno sistema di sforzi, p. es. compressione. Il fenomeno, detto *piezoelettricità* (Hankel, 1881) si completa con il fenomeno inverso brillantemente preconizzato mediante considerazioni teoriche dal Lippmann (1881) e immediatamente dopo scoperto dagli stessi Curie (1881). La recente ingegnosissima applicazione di questo fenomeno ai sondaggi marini ha cooperato largamente al suo ulteriore studio.

Poco dopo si osservano i primi fenomeni di emissione di cariche negative dai corpi incandescenti (*effetto termoionico*, Edison, 1884) (1) che in quest'ultimo decennio hanno meravigliato il mondo scientifico e non scientifico per le innumerevoli applicazioni fisiche e tecniche di cui sono stati suscettibili, e i fenomeni di emissione di cariche negative dai metalli illuminati con luce di frequenza sufficientemente elevata (*effetto fotoelettrico*, Hertz, 1887; Hallwachs, 1888).

Questi fenomeni, a cui si può aggiungere la *radioattività* (H. Becquerel, 1896; P. ed S. Curie, 1898), apparvero dapprima come mezzi per rendere conduttori i gas; più precisamente essi consistono in una separazione di cariche eteronome. Essi completano l'elenco dei mezzi oggi, per questo scopo, a disposizione dell'elettrostatica, e ricordati qua e là nelle pagine che precedono.

Termoionica e fotoelettricità si presentano con modalità diverse per i vari metalli, quindi costituiscono, con l'effetto Volta al quale sono d'altronde strettamente legati, due dei pochi elementi di distinzione elettrostatica tra i vari metalli.

16. - Compiuto in certo senso il ciclo di ricerche sui dielettrici *perfetti* mediante le esperienze di Boltzmann, seguì un gruppo numerosissimo di lavori allo scopo di chiarire i fenomeni estremamente complessi presentati dai dielettrici *reali*. Le anomalie che questi presentano per rispetto al comportamento dei dielettrici perfetti sono così numerose e di regola concomitanti da non meravigliare che solo molto recentemente si sia saputo mettere un po' d'ordine in esse: un dielettrico reale presenta una serie di anomalie analoghe a quelle che presenta un solido elastico reale.

Si ha infatti:

Solidi elastici		Dielettrici	
perfetti	reali	perfetti	reali
vale la legge di Hooke. P. es. per gli allungamenti S in funzione della forza F: $S = k.F$ con k costante.	1. k è funzione di F cioè la linea $S = f(F)$ non è una retta. 2. Le curve $S = f(F)$ di andata e di ritorno non si sovrappongono (isteresi elastica). 3. k dipende dalla durata di azione della forza F (*elasticità susseguente* sotto carico o al cessare di questo); ciò produce una deformazione del ciclo di isteresi 2. con la durata del ciclo. 4. Si ha *scorrimento*, cioè viscosità, anelastica, come nei liquidi.	$\mathcal{D} = \varepsilon \mathcal{E}$ con ε costante	1. ε è funzione di $\mathcal{E}$, cioè la linea $\mathcal{D} = f(\mathcal{E})$ non è una retta. 2. Le curve $\mathcal{D} = f(\mathcal{E})$ di andata e di ritorno non si sovrappongono (isteresi dielettrica). 3. ε dipende dalla durata di azione di $\mathcal{E}$ (*dielettricità susseguente*, già detta *penetrazione delle cariche*); ciò produce una deformazione del ciclo di isteresi 2. con la durata del ciclo. 4. Si ha nel dielettrico una lieve *conducibilità* elettrica.

(1) J. H. POYNTING e J. J. THOMSON: *A text-book of physics. Electricity and magnetism*, 1ª e 2ª parte, London, 1914, p. 49, 138.
(2) J. H. POYNTING e J. J. THOMSON, op. cit., p. 143.
(3) WINKELMANN: *Hand. der Phys.*, 4° vol., Leipzig, 1905, p. 164.
(4) J. H. JEANS, op. cit., p. 181.

(1) La conducibilità prodotta dai corpi incandescent nel gas circostante era già nota da tempo; si ha già fin dal 1853 un lavoro d'insieme di E. Becquerel, e fin dal 1873 Guthrie segnalava l'asimmetria di comportamento delle cariche positive e negative.

Digitized by Google

Gli stessi fenomeni si presentano anche nei corpi ferromagnetici, ma si può dire che vi costituiscano un insieme meno complesso, perchè manca l'analogo magnetico della conducibilità elettrica.

Tra i lavori più recenti che hanno cooperato a stabilire chiaramente tale analogia dei dielettrici reali con i corpi ferromagnetici e meglio ancora con i corpi elastici, mi limito a ricordare quelli di Saegusa (1921-1925) tendenti specialmente a studiare le due forme di isteresi su ricordate, e quelli di Valasek (1922) e Frayne (1923) sul sale di Seignette; i cristalli di questo sale presentano un valore di ε eccezionalmente elevato (fin circa $\varepsilon = 1000$); su di essi è risultata ben evidente l'analogia tra polarizzazione magnetica (magnetismo indotto) delle sostanze ferromagnetiche e polarizzazione dielettrica.

Nè si possono ritenere esaurite le ricerche in questo campo, che ha grande interesse pratico nella tecnica degli impianti a corrente alternata, specialmente se ad alta tensione.

17. - Si è giàdetto che poco di nuovo può aggiungersi alle grandi linee teoriche dell'elettrostatica già acquisite fin dal tempo di Maxwell.

Segnò decisamente il passo il problema generale dell'elettrostatica per mancanza di nuovi mezzi matematici atti a trovare soluzioni del problema di Dirichlet. Il confronto tra la raccolta di casi risoluti presentata da Maxwell (1873) e da Jeans (1925) mostra chiaramente l'arresto. Riconosciuta la difficoltà a trovare la soluzione con date forme del contorno (cioè per un dato problema elettrostatico) ci si è da tempo ridotti al processo inverso: trovata una soluzione, si studia la forma delle superficie $V = \text{cost.}$ che le corrispondono. Si ottiene così la forma e la posizione dei conduttori (contorno del campo) per cui il problema è risoluto (1).

Oltre il già citato lavoro del 1881, dobbiamo ricordarne un altro notevolissimo di Helmholtz: quello sui *doppi strati* elettrici (1879, analogo elettrico delle lamine magnetiche, introdotto dall'Helmholtz fin dal 1853) avente per scopo immediato l'interpretazione dei fenomeni di triboelettricità, di *Strömunsstrom*, di elettroosmosi, ma dominante in effetto tutti i fenomeni dovuti a differenze di potenziale al contatto, le quali si vedono attribuite tutte all'esistenza di opportuni doppi strati.

La tendenza a ricondurre la teoria elettrostatica ai soli principi di energetica si nota nei lavori di Duhem (2) e di Pellat; è di quest'ultimo (1895) l'elegantissima deduzione energetica del *succhiamento* di un dielettrico posto in campo elettrostatico non uniforme.

Ma la discussione sui principî, pur senza spegnersi, andò notevolmente languendo.

È notevole il tentativo di Pellat (1) di costruire una elettrostatica che, senza essere maxwelliana, sia però svincolata dalla legge di Coulomb. Ma questo tentativo a me pare fallito. Oltre alcune altre ipotesi la cui portata è notevole e tutt'altro che evidente (loc. cit., 1° vol., p. 71, 76), il fatto sperimentale che Pellat sostituisce alla legge di Coulomb è (loc. cit., p. 76) la ben nota proprietà del campo elettrostatico di essere nullo in tutti i punti di una cavità scavata in un conduttore, e non contenente cariche elettriche. Ora questo fatto è conseguenza immediata della legge di Coulomb, quando si ammetta che questa legge valga per l'azione delle cariche esterne fin dentro la cavità, attraverso il metallo delle sue pareti; ma viceversa è anche noto che da questo fatto si deduce la legge di Coulomb sol che si ammetta che le forze elementari siano forze centrali (ciò che è inevitabile conseguenza di evidenti ragioni di simmetria) che agiscono anche attraverso la parete della cavità (2). Perciò Cavendish, dalla mancanza di campo e quindi di cariche all'interno della cavità, aveva già dedotto la validità della legge dell'inversa del quadrato $f = \frac{k}{r^n}$ con $n = 2 \pm \frac{1}{50}$. Maxwell, ripetendo la stessa prova con un metodo più sensibile, aveva stabilito per n il valore $2 \pm \frac{1}{21600}$.

È evidente dunque che Pellat giunga anch'egli all'elettrostatica coulombiana e in particolare alla legge di Coulomb.

In che cosa consiste dunque il vantaggio della nuova esposizione del Pellat? Non certo nel modo con cui giunge al teorema di Coulomb e poi successivamente alle altre formule dell'elettrostatica (loc. cit., pp. 77-86; 93-95), modo che lascia disorientato anche un lettore attento. Il vantaggio consiste nell'essersi liberati dall'estrapolazione enorme contenuta nell'ordinaria applicazione della legge di Coulomb: « non è per nulla evidente », dice il Pellat, (loc. cit., p. 256) « che la legge di Coulomb valga quando siano in presenza altre cariche oltre le due cariche elementari tra cui si considera l'azione attrattiva e repulsiva, e quando tra queste due cariche non sia interposta soltanto dell'aria. Queste difficoltà, e più ancora l'inesattezza della legge di Coulomb in dielettrici non omogenei, mi hanno spinto a fondare l'elettrostatica su altre leggi ».

Ma l'estrapolazione di cui il Pellat ha bisogno non è minore, perchè l'esperienza della cavità vale nell'interno di un conduttore a pareti sia pure sottili, ma non nulle; e nessuno ci autorizza a ritenerla valida per lo spazio dieletrico interno a una superficie sferica cava di un conduttore (loc. cit., p. 79) uniformemente elettrizzata, cioè nell'assenza dell'inter-

(1) V. le magnifiche considerazioni in proposito di p. 142-143 del *Treatise* di Maxwell. V. però, per ulteriori sviluppi specialmente mediante le funzioni coniugate: J. J. Thomson: *Recent researches in electr. and magn.*, III Cap., Oxford, 1893.

(2) P. Duhem: *Leçons sur l'électr. et le Magnét.*, Paris, 1891-1892; tre volumi nei quali l'elettrostatica riceve un amplissimo sviluppo (vol. 1° e 2°).

(1) 1896-1900: *Cours d'électricité*, 3 vol., Paris, 1901-1908, 1° vol., 1901, passim. Vi si noti l'ingiustificata idiosincrasia per la *polarizzazione* dei dielettrici alla Faraday-Mossotti.

(2) J. H. Poynting, *Brit. Ass. Rep.*, p. 523, 1886. Interessante notare, col Poynting, che il Maxwell, mentre nel suo *Treatise* tende a dar particolare valore a questa prova indiretta della legge di Coulomb, nel libro elementare sull'elettricità, opera postuma che rappresenta probabilmente un ulteriore stadio concettuale dell'autore, ritorna alla giustificazione sperimentale diretta di tale legge.

Digitized by Google

posto conduttore, e l'esperienza è ineffettuabile. È poi perchè prendersela con l'estrapolazione certo fortissima dalle poche e non molto precise esperienze di Coulomb al campo vastissimo in cui la legge di Coulomb viene applicata, quando in fisica si procede sempre per estrapolazioni così coraggiose? È forse minore l'estrapolazione con cui si giunge a enunciare il primo, il secondo principio della meccanica, o il primo, il secondo principio della termodinamica?

L'elettrostatica nella trattazione coulombiana fruisce effettivamente di una cotale estrapolazione: si suppone che la legge di Coulomb, verificata tra due cariche quasi puntiformi in dielettrico omogeneo, valga tra due cariche elementari poste alla superficie dei conduttori, anche se separate da dielettrico eterogeneo o addirittura da un mezzo conduttore, purchè sia di ugual natura il dielettrico a contatto dei due elementi di superficie conduttrice che sopportano quelle due cariche elementari. Il teorema di Gauss, dimostrato nel caso che il dielettrico sia omogeneo e la superficie chiusa giaccia tutta in esso, si applica, sia pure al caso di dielettrico omogeneo, ma a superficie chiuse che giacciono in parte (teorema di Coulomb, espressione della tensione elettrostatica, teorema delle superficie corrispondenti....), o tutte addirittura (teorema sugli schermi elettrostatici, sull'induzione totale....) entro il metallo, come se al metallo, spettasse il valore della costante dielettrica del mezzo circostante!

L'unica giustificazione di questo modo di procedere sta nell'accordo tra le conseguenze alle quali si arriva e i fatti sperimentali conosciuti. Certo che qui l'ammettere per ε nel metallo il valore che compete al dielettrico circostante più che una estrapolazione è uno sproposito che per fortuna non ha conseguenze; per fortuna il contributo al flusso dovuto alla porzione di superficie entro il conduttore è nullo (perchè $\mathcal{E}$ è nullo) qualunque sia il valore di ε purchè.... non infinito!

Le elettrostatiche coulombiane svolte più o meno elementarmente in quasi tutti i libri di fisica si poggiano su tale errore. Per svincolarsene bisogna avere il coraggio di fare, in favore della legge di Coulomb, una estrapolazione anche più forte di quella già accennata, e che ci è fornita da una applicazione integrale della teoria della polarizzazione del dielettrico (Faraday, Thomson, Mossotti, Gouy): è nell'Ollivier (1) che vedo stabilito nel modo più ardito e preciso questo concetto: « La forza che si esercita tra due corpicciuoli portanti le cariche m ed m' è $f = k\frac{mm'}{r^2}$ ove è $k = 1$ in unità C.G.S. elettrostatiche per qualunque mezzo (vuoto, dielettrico anche non omogeneo, conduttori, ecc.). Alla forza agente sulla massa m' contribuiscono tutte le masse elettriche presenti nel campo, sia quelle date per costituire il campo, sia quelle di polarizzazione che si manifestano nei dielettrici ponderabili, sia quelle indotte alla superficie dei conduttori.

Su ogni conduttore la distribuzione delle cariche positive o negative (sia date che di induzione) è tale che nell'interno del conduttore il campo dovuto a tutte le cariche sia nullo; ciononostante un conduttore è *trasparente* per le azioni elettriche tanto come un dielettrico o il vuoto ».

Su questa base l'elettrostatica coulombiana può allora costruirsi logicamente sia nel caso di dielettrico omogeneo che nel caso di dielettrico eterogeneo.

Oggi la legge di Coulomb, anche così generalizzata, dorme i suoi sonni tranquilla (1); così ad es. ogni tentativo per saggiarne la portata fino alle distanze atomiche o intraatomiche si è risoluto in una sua nuova vittoria (2); su di essa si impernia tutta la moderna teoria elettrica della materia.

18. - Cadde in disuso nella seconda metà del secolo scorso, dietro l'autorevole impulso di W. Thomson, l'abitudine di parlare di *fluido* o *fluidi elettrici*, preferendosi parlare di *elettricità*, termine più vago, ma più adatto a *evitare immagini troppo materiali* sulla natura di questa.

Coll'inizio di questo secolo, affermatasi prepotentemente la *teoria elettronica* e poi la teoria puramente elettrica della materia (atomo di Nagaoka, 1903-1904; Rutherford, 1911; Bohr, 1913) prevalse il concetto diametralmente opposto, giungendosi fino a negare ogni esistenza alla materia se non in quanto essa è elettricità positiva o negativa. Ma, affermatasi contemporaneamente la struttura corpuscolare dell'elettricità dei due segni (*elettroni*, negativi; *protoni*, positivi) non tornò in onore la vecchia nomenclatura di *fluido*, poco adatta a ricordarne tale riconosciuta struttura discontinua.

Tra la teoria frankliniana (un fluido positivo mobile nei fenomeni di conduzione elettrica, più la materia avente i caratteri dell'elettricità negativa, ma ferma) e quella symmeriana (due fluidi mobili, più la materia ferma) la teoria elettrica moderna ha salomonicamente concluso per due fluidi costituenti l'uno e l'altro la materia, e perchè la condiscendenza verso le idee di Franklin non fosse troppo forte.... quello dei due fluidi che ha meno diritto di chiamarsi materia (perchè costituisce solo una parte minima della massa dei corpi) e che forse può ritenersi l'unico mobile nei fenomeni di conduzione metallica, è il fluido negativo.

Resta dunque una asimmetria tra i due fluidi la quale ravvicina questa teoria a quella frankliniana.

(1) H. Ollivier: *Cours de phys. gén.*, 1° vol., 2ª ed., Paris, 1921, p. 105.

(1) Una lunga memoria sulla validità della legge di Coulomb (S. Pienkowski: *Mém. Soc. Roy. des Sc.*, Liège, 1913) mi ha lasciato altrettanto a lungo perplesso. Vorrei citare questo lavoro in favore della validità della legge di Coulomb anche se buona parte del segmento rettilineo che congiunge due elementi di carica tra loro agenti è costituito da conduttore (esperienze di Pienkowski sull'attrazione o repulsione tra sfere cariche di segno contrario od uguale, diametro 15 ÷ 20 cm., distanza 0 ÷ 40 cm. circa). Dovrei citarlo per la contraddizione che questo autore segnala tra le deduzioni dalla teoria coulombiana e la repulsione misurata tra due emisferi carichi ed inizialmente a contatto. Questa (tensione elettrostatica) non è dunque la risultante delle azioni coulombiane? O che la legge di Coulomb valga per le repulsioni attraverso le sfere, e non.... attraverso le emisfere?

(2) V. p. es. E. Rutherford e J. Chadwick: *Phil. Mag.*, 50, p. 889, 1925.

Digitized by Google

Gli argomenti infatti in favore di questa si riconducevano tutti alle osservate asimmetrie tra i fenomeni presentati da corpi carichi di segno opposto (p. es. nella scarica in aria rarefatta, o no) (1).

Colle recenti teorie elettriche della materia, nelle quali conservazione della materia e conservazione dell'elettricità diventano lo stesso principio, risorsero talune vecchie questioni, come ad es. quella dello spessore dello strato di elettricità costituente la carica superficiale di un conduttore; si mutò un poco il modo di parlare e il modo formale di concepire i fenomeni e apparve qualche raro lavoro tendente a presentare risultati, ormai acquisiti per l'elettrostatica, alla luce della teoria corpuscolare (2).

Ma, così come tutta l'idrostatica si può svolgere ignorando la teoria molecolare dei liquidi finchè non si urta nei fenomeni capillari, di pressione osmotica, ecc., analogamente l'elettrostatica può ignorare completamente la natura corpuscolare dell'elettricità finchè non si prendono in considerazione i problemi relativi ad alcune cause di forze elettromotrici (effetto Volta, triboelettricità, ecc.).

19. - Dal punto di vista delle due teorie elettrostatiche coulombiana e maxwelliana, la teoria elettronica non ha portato elementi decisivi, sicchè ci è dato di leggere che:

« The electron theory is, substantially, a much more high developed and dynamical form of Faraday's [= Maxwell's] theory » (J. H. Poynting e J. J. Thomson, op. cit., 1914, p. V);

oppure che:

« There is no reason at all why the force should be due to pressures or stresses in the universal medium.... We must be aware that they [stresses] are only immaginary ones, nothing else than auxiliary mathematical quantities » (H. A. Lorentz: *The theory of electrons*, Leipzig, 1909, p. 31).

Certo la teoria elettronica ha dimostrato l'estrema *souplesse* e fecondità della semplice teoria coulombiana. La teoria elettronica è in grado di dare una risposta oggi esauriente a una obiezione mossa da tempo alla teoria coulombiana: nell'interno di una distribuzione elettrica di volume, come può aversi p. es., in un dielettrico, il potenziale V è bensì funzione finita sebbene l'integrale che lo rappresenta: $V = \int \rho . \frac{dv}{r}$ presenti per $r = o$ una singolarità. Fisicamente, però, la considerazione di tale integrale presuppone la validità della legge di Coulomb fino al limite $r = o$.

Ebbene la teoria elettronica considera valori di V anche in seno a corpi macroscopicamente elettrizzati, ma, finchè almeno non si avranno sicuri elementi per discutere sulla costituzione dell'elettrone, o magari del protone, può limitarsi a considerare i valori di V negli spazi (in proporzione smisurati) che separano le varie cariche elementari; e in questi spazi, fin dove si sono spinte le nostre induzioni (1), la legge di Coulomb è valida ed r non è mai nullo.

Così pure fecondissima è apparsa la teoria coulombiana nei tentativi moderni sulla struttura elettrica dell'atomo, sull'origine delle forze di coesione e di adesione, sull'affinità chimica, e, infine, con opportune modificazioni della legge elementare (Lorentz, Ritz, ecc.) sulla costruzione di tutta una elettrodinamica che potremmo dire coulombiana!

La discussione non è ancor chiusa, e le teorie sono ancora di fronte, ma su piede pari, questa volta. E infatti, con la rinunzia dei fisici di ambo le parti a vedere nella propria teoria l'esistenza *reale* degli enti fisici primitivi sui quali la teoria è imbastita (cariche elettriche di Coulomb, o etere quasi elastico, o energia del mezzo), ma soltanto un coordinamento logico utile per dedurre da poche ipotesi tutta una massa di fatti sperimentali, la scelta dell'una o dell'altra teoria diventa una questione filosofica, o, più modestamente: una questione di comodità che, nel caso particolare che ci interessa, si identifica col gusto o l'inclinazione personale (2).

Si preferisce ammettere la costituzione elettrica della materia e la legge di Coulomb?

O si preferisce ammettere l'esistenza di un ipotetico etere soddisfacente a un certo gruppo di ipotesi elettrico-elastiche che io rinunzio ad esporre in poche parole perchè non credo ciò possibile?

O si preferisce ammettere il gruppo di proprietà matematiche atto a individuare i vettori $\mathcal{D}$ ed $\mathcal{E}$ e l'espressione della densità dell'energia distribuita nel mezzo per il piacere di veder sgorgare da queste, come dal magico tavolino di un prestidigitatore, la teoria del potenziale di Green o.... la legge di Coulomb? (3).

Io mi comprometto un po' troppo. Non nego infatti le mie simpatie per la teoria che anche gli avversari devono riconoscere come più semplice, salvo a bollarla come *morta descrizione* (2). È *morta descrizione* una teoria capace con sintesi stupenda di raccogliere tutta l'elettrostatica sotto un'unica legge, e capace ogni giorno di più di dar ragione di tutti i fenomeni atomici e molecolari? Allora è morta descrizione anche la teoria della gravitazione universale fondata sulla legge di Newton?

Forse si fa colpa alla teoria di Coulomb di ammettere l'azione a distanza? Ma, mentre abbiamo visto che la mente di un Faraday non si rifiutava al pensiero dell'azione a distanza, oggi, a causa essenzialmente

(1) V. p. es. G. Singer: *Elémens d'électricité et de galvan.* Trad. franc., Paris, 1817, p. 71-75.

(2) V. p. es. L. Silberstein: *Phil. Mag.*, 36, p. 413, 1918.

(1) V. p. es. E. Rutherford e J. Chadwick: *Phil. Mag.*, 50, p. 889, 1925.

(2) O. W. Richardson: *Electron theory of matter.* Cambridge, 1916, p. 13-14.

(3) Per la classica teoria del potenziale e l'elettrostatica coulombiana, vedi: H. Helmholtz: *Vorlesungen ü. Elektrodynamik und theorie des Magn.* Leipzig, 1907, herausgeg. von Krigar-Menzel und Laue.

Per la teoria maxwelliana pseudoelastica, v. J. H. Poynting e J. J. Thomson, op. cit., 1914.

Per la seconda forma della teoria di Maxwell, v. M. Abraham: *Theorie der Elektrizität.* 6ª ed., Leipzig, 1921.

Infine veggasi il bel libro di J. H. Jeans: *The mathematical theory of electricity and magnetism.*, 5° ed., Cambridge, 1925, ove è evidente l'influenza del metodo di esposizione del Maxwell, e le varie teorie elettrostatiche vengono presentate contemporaneamente.

Digitized by Google

del predominio delle teorie corpuscolari in ogni campo (molecole, atomi, granuli di elettricità) si finisce col tentar di ricondurre tutte le azioni ad azioni a distanza (1).

Forse la teoria coulombiana ha il difetto di troncare a priori ogni discussione sulla natura dell'elettricità? E la teoria maxwelliana non tronca ugualmente ogni discussione sulle cause per cui in dati punti del campo *div* di volume, o *div* superficiale dei vettori $\mathcal{D}$ ed $\mathcal{E}$ sono diversi da zero?

Si conviene ormai generalmente per l'equivalenza di portata delle due teorie; e allora perchè non scegliere la più semplice?

Ma la teoria di Maxwell è preferibile per i vantaggi notevoli che presenta in elettrodinamica, e, ammessa la teoria elettromagnetica di Maxwell, l'elettrostatica vi si trova contenuta come caso particolare.

Il guaio è che ormai nella roccaforte della teoria di Maxwell, nell'elettrodinamica, c'è la rivoluzione. È sintomatica la sottile ma ben significativa trasformazione avvenuta a questo riguardo nella stessa scuola di Cambridge (2).

I fenomeni ottici nei corpi in moto, i fenomeni raccolti dalla teoria dei quanta si ribellano alla teoria di Maxwell, la quale rischia di essere battuta in breccia non solo nell'esistenza dell'etere (3), ma addirittura nelle classiche equazioni (4).

Resta ancor l'argomento:

« If something [energia] is trasmitted from one particle to another at a distance, what is its condition after it has left the one particle and before it has reached the other? » (Maxwell: *Treatise*. 2° vol., p. 437-438).

Premesso che tra il *vuoto* pieno di *etere* e il *vuoto* capace di essere pieno di *energia* c'è solo l'imbarazzo della scelta, nelle teorie recentemente proposte si trova risposta anche a tale terribile domanda di Maxwell: energia è massa (forse ogni massa non è che concentrazione di energia), l'energia emessa da un corpo viaggiante nel vuoto, è materia che si trasferisce dal corpo emettente verso il suo destino. Così la teoria dei *quanta di luce*. È la teoria di Newton dell'emissione che riappare, ma timida ancora perchè incapace di dominare i fenomeni di interferenza e di diffrazione, e, in quanto si ravvicina all'*ipotesi balistica* di Ritz, incapace forse di dominare i fenomeni ottici nei corpi in moto.

20. - La teoria della polarizzazione dei dielettrici perfetti, cioè la teoria di Mossotti, ha trovato il modo di adattarsi alle vedute moderne sulla costituzione della materia nel modo più immediato e con risultati davvero incoraggianti (1). Non solo la teoria già citata di Debye non ci obbliga a trangugiare ostiche o inverosimili ipotesi sulle origini della polarizzazione, ma riesce facilmente, come la teoria di Langevin per il magnetismo, a dar ragione della dipendenza di ε dalla temperatura, e, con una opportuna considerazione di dipoli molecolari e dipoli intraatomici, della dipendenza di ε dalla frequenza del campo elettrico alternato che serve a determinare tale costante.

Oggi questa teoria elettronica della polarizzazione dei dielettrici perfetti è in trattative per diventare vassalla della *teoria dei quanta*.

Al contrario la teoria dei dielettrici reali, pur beneficiando anch'essa dei vantaggi presentati dalla teoria elettronica, è poco più innanzi di dove l'ha lasciata Maxwell (*Treatise*, 1° vol., § 328 e segg.), cioè molto indietro, perchè non trovo che dalla ipotesi maxwelliana (i dielettrici reali sono eterogenei, p. es. sono costituiti da strati o globuletti di dielettrico lievemente conduttore, immersi in dielettrico isolante e perfetto) si riesca a dedurre molto di più di quanto non sia evidente. Del resto troppa importanza si è data a questa ipotesi alla quale lo stesso Maxwell (§§ 327, 330) non dava che valore di esemplificazione (2).

21. - Siamo al termine di questi rapidi cenni di storia di 150 anni di elettrostatica.

Ma inutilmente si cercherà qui l'elenco delle impreviste, meravigliose applicazioni che arricchirà altre monografie di questo numero voltiano.

Si deve dunque considerare l'elettrostatica come una scienza pura, pura, fino ad essere inutile?

Collega di uno degli inventori della *separatrice elettrostatica Bibolini-Riboni*, che, sfruttando elegantemente la differenza di costante dielettrica e di conducibilità dei vari costituenti del *tout-venant* della miniera, riesce ad ottenerne l'immediata separazione con profitto industriale (blenda da pirite; zolfo dalle varie ganghe), io non credo che l'elettrostatica sia una scienza inutile, anche per diretti scopi pratici.

D'altra parte non è inutile lo studio della scienza che ha fornito alla tecnica sperimentale le bilance monofilare e bifilare, alla fisica la legge di Coulomb, alla fisica matematica la teoria del potenziale. Non è inutile la scienza che fornisce elettrometri e condensatori rendendone possibili le innumerevoli applicazioni; che con l'uso del quarzo piezoelettrico ha risoluto in modo spettacoloso un problema di sommo interesse: la determinazione praticamente istantanea delle profondità del mare. Non è inutile la scienza alla quale si ricorre necessariamente nella teoria degli audion (3) e dalla quale si attende ansiosi la

(1) J. H. JEANS, op. cit., p. 141.

(2) Confrontare la 3° e la 5° ediz. del JEANS, op. cit.: pp. 3, 4, 140, 142 e in generale i Cap. XX e XXI della nuova ediz. e specialmente il § 701, che non ha l'analogo nella 3° ediz.

(3) *En résumé aucune conception méchanique de l'éther n'a conduit au but.* W. RITZ, *Scientia*, 3, p. 268, 1908.

To every experimental enquiry, Nature seems to give the answer either that there is no ether or that natural phenomena go on exactly as if there were no ether. JEANS, op. cit., p. 4.

Sono queste le scoraggianti conclusioni di mezzo secolo di ansiosa ricerca dell'etere e delle proprietà da attribuirgli.

(4) L'accordo tra teoria di Maxwell e teoria dei quanta sarà forse presto concluso sulla base della recentissima teoria di SHRÖDINGER?

(1) V. p. es. O. W. RICHARDSON, op. cit., IV Cap.; O. BLÜH, lav. cit.

(2) Pour la bonne bouche, leggere: H. BOUASSE, op. cit. 3° vol., 1920, § 122.

(3) e in genere dei fenomeni di conduzione nei gas. Con l'audion, il problema elettrostatico della griglia, svolto da Maxwell (*Treatise*, § 203 e segg.) e ripreso da W. Thomson (1891) ha assunto un'imprevista importanza pratica notevolissima.

Digitized by Google

ragione di catastrofi aeree che anche recentemente (1) hanno commosso l'opinione pubblica.

Certo oggi per rispetto agli altri rami dell'elettricità, il cui valore pratico è evidente, l'elettrostatica ha piuttosto un valore propedeutico, ma essenziale.

La teoria dell'elettrostatica è poi da considerarsi come uno degli esempi più istruttivi di *teoria fisica* per la molteplicità di aspetti che ancor oggi essa presenta. Poche discussioni teoriche furono tanto proficue per l'ulteriore progresso scientifico e per un'ulteriore chiarificazione delle idee, quanto quella alla quale abbiamo largamente accennato tra sostenitori della teoria coulombiana e della teoria maxwelliana.

22. - Non è facile stabilire gli ulteriori compiti di una scienza, ma, sebbene io abbia detto come l'inquadratura generale dell'elettrostatica sia ormai acquisita, molto resta ancora da fare.

Non voglio con ciò alludere al problema generale dell'elettrostatica che ho detto arrestato da difficoltà matematiche; ma, a mostrare quanto possiamo aspettarci da ulteriori studi di elettrostatica, basterà che io ricordi alcune elementari questioni che ancora attendono una risposta esauriente.

Perchè le cariche elettriche sono trattenute dalla superficie dei conduttori ?

Quali sono le origini dell'elettricità atmosferica?

Qual'è il valore della costante dielettrica dei conduttori ?

E, domanda ancora più caratteristica, quale è la causa e il meccanismo della triboelettricità, cioè della separazione delle cariche per strofinio ?

Si è ormai sicuri che la triboelettricità deve essere originata dal contatto tra due corpi eterogenei, che dunque la sua causa prima è comune con l'effetto Volta, si è intravista una relazione tra effetto triboelettrico e costante dielettrica (Coehn, 1898), ma anche la teoria elettrica della materia non ha ancor potuto dare di questo fenomeno primitivo una immagine soddisfacente sia pur qualitativamente.

Il fenomeno millenario dal quale scaturì l'intera scienza elettrica moderna, custodisce gelosamente il segreto delle leggi che lo governano.

(1) Catastrofe del Dixmude, dicembre 1923 ; sui fenomeni elettrostatici nei dirigibili, v. G. S. FULCHER : *Av. and aeron. Eng.*, 7, p. 174, 1919.

Digitized by Google

PROF. O. M. CORBINO
ISTITUTO FISICO R. UNIVERSITÀ DI ROMA

L'EFFETTO VOLTA E LA TEORIA ELETTRONICA DELLA PILA

Digitized by Google

Digitized by Google

Con la scoperta della pila Alessandro Volta dava alla Scienza il primo e più semplice strumento di produzione della corrente elettrica, e apriva la via allo studio degli effetti della corrente e alle loro mirabili applicazioni; ma poneva, insieme, alla Fisica un problema tormentoso, al quale, dopo oltre un secolo di indagini e di discussioni, non fu ancora data una definitiva risposta.

Le indagini e le discussioni sul funzionamento della pila non vanno però considerate come esercitazioni vane e infruttuose; si deve anzi a quelle indagini, direttamente o indirettamente, la scoperta di molti importanti fenomeni nuovi, e anche la costruzione di capitoli fondamentali della Elettrologia. Perfino negli studi più recenti sui fenomeni termoionici e fotoelettrici ricompare sotto veste nuova la secolare contesa, con risultati per alcuni aspetti decisivi.

La teoria del contatto che lo stesso Volta fondò e che gli servì di guida nella sua grande scoperta suole essere ritenuta come una feconda ma insostenibile ipotesi di lavoro. Se le considerazioni che esporrò in questo studio sono attendibili, si deve invece ritenere che quella teoria, naturalmente integrata coi concetti sopravvenuti della Energetica, è ancora sostanzialmente esatta, al lume dei fatti più recentemente osservati e di una loro giudiziosa interpretazione.

* * *

1. - *L'effetto Volta.*

Cominceremo dalla enunciazione del fenomeno fondamentale scoperto dal Volta, e che, dopo lunga e profonda discussione critica delle circostanze sperimentali atte a produrlo, può considerarsi come sicuramente accertato.

Due metalli in contatto creano nella spazio anche perfettamente vuoto che li circonda un campo elettrico, il quale è nei suoi effetti esterni del tutto indistinguibile da quello che si otterrebbe attribuendo ai due metalli due potenziali elettrostatici diversi V_1 e V_2. La differenza dei potenziali V_1 e V_2 dipende solo dalla natura dei metalli.

Questo fenomeno si designa col nome di effetto di Volta. Egli ne scoperse l'esistenza nell'aria, con la celebre esperienza dei due dischi di rame e di zinco tenuti da sostegni isolanti, portati prima in contatto, poi separati e saggiati con l'elettroscopio. Parve per molto tempo che il campo elettrico constatato fra i due metalli avesse per origine un'azione chimica disuguale esercitata su di essi dall'atmosfera gassosa che li ricopre; e che perciò quel campo, e con esso l'effetto Volta, sparirebbero se i due metalli, trovandosi nel vuoto assoluto, fossero sottratti a ogni azione chimica superficiale. Questo dubbio non è più consentito dopo un esame approfondito dei risultati di esperienze antiche e recenti. È ben vero che un'atmosfera di gas chimicamente attivo per qualcuno dei due metalli può perturbare il valore del campo elettrico e anche invertirne il senso; ma ciò solo pel fatto che alle primitive superfici metalliche si sostituiscono superfici alterate, e che il campo elettrico esterno dipende solo dalle superfici più esterne dei corpi in contatto (legge delle tensioni del Volta). Si tratta perciò di perturbazioni create dal gas ambiente a un fenomeno che si produce in maniera ed entità ben determinate fuori del gas e di ogni azione chimica. Ciò risulta con particolare nettezza dalle esperienze dirette del Perucca, e da quelle sull'effetto termoelettrico di Richardson, e ancora meglio dalle ricerche di Millikan (1916-1921) e di altri sui fenomeni fotoelettrici. Già le misure dirette del Perucca, il quale ripetè l'esperienza di Volta nel vuoto con superfici metalliche direttamente formate per distillazione nel vuoto e nello stesso apparecchio di misura, sono esenti dal dubbio dell'influenza di un'atmosfera superficiale gassosa che potrebbe rendere illusori i risultati. Quanto agli altri procedimenti elettronici, pur trattandosi di metodi indiretti di indagine sulla questione, è opportuno darne una illustrazione per la loro grande efficacia probativa.

Un metallo è allo stato neutro e non crea alcun campo elettrico intorno a sè se la somma algebrica delle sue cariche intra ed extra-atomiche è nulla; togliendo o aggiungendo elettroni al metallo inizialmente allo stato neutro se ne muta il potenziale elettrostatico e sorge al suo esterno un campo elettrico.

Ma il togliere un elettrone al metallo, sia pure di quelli extra-atomici cui è dovuta la conducibilità elettrica, e il portarlo nelle immediate vicinanze di esso, implica, come l'esperienza dimostra, la necessità di eseguire un lavoro, indipendente dal potenziale *elettrostatico* al quale il metallo si trova. Possono gli elettroni venir fuori spontaneamente da un metallo caldo (fenomeno termoionico di Edison); in

Digitized by Google

tal caso il lavoro di uscita è fatto a spese della forza viva che possiedono gli elettroni nel metallo e che aumenta con la temperatura.

Il meccanismo è analogo a quello che permette la evaporazione spontanea di un liquido nel vuoto. E come si parla del calore di evaporazione interno, cioè del lavoro necessario per la separazione di una molecola di vapore dal suo liquido, così si considera una specie di energia di vaporizzazione degli elettroni dal metallo, esprimibile con l'energia che un elettrone deve impiegare per staccarsi da esso. Ad alta temperatura l'emissione di elettroni diviene abbondante; essi si possono raccogliere su una placca disposta avanti a un filo incandescente, applicando fra filo e placca una tensione elettrica opportuna. Si ha allora una corrente elettrica permanente dalla placca al filo. È il fenomeno utilizzato nella lampada termoionica cui deve i suoi più grandi progressi la Radiotelegrafia e Telefonia moderna.

La teoria di queste emissioni elettroniche di temperatura è stata svolta dal Richardson. Egli dedusse una relazione tra la corrente termoionica, la temperatura T del filamento e l'energia di estrazione di un elettrone. L'esperienza permette così, attraverso a varie difficoltà, di ottenere il valore di questa energia.

Si può anche procedere a una determinazione diretta dell'energia di estrazione, profittando della fatta constatazione che il filo emettente elettroni si raffredda alquanto, come un liquido che evapora; dal calore assorbito nella emissione elettronica e dal numero di elettroni emessi si è potuto dedurre l'energia necessaria alla estrazione di un elettrone. Si sono così, per i corpi su cui si è sperimentato, ottenuti valori praticamente eguali a quelli determinati applicando la formola di Richardson.

Tale energia può anche essere comunicata agli elettroni da un'onda elettromagnetica che cade sul metallo; da ciò la proprietà dei metalli di emettere elettroni sotto l'azione della luce. È il fenomeno della fotoelettricità. Oggetto di studi svariati che avevano piuttosto un carattere empirico, una profonda sistemazione fu apportata al fenomeno dalla celebre formola di Einstein.

Secondo questa formola, connessa alla teoria dei quanti, la luce di frequenza υ, e di qualsiasi intensità, provoca l'uscita di elettroni da un metallo, solo se il prodotto di υ per la costante h di Planck (eguale a $6{,}55 \times 10^{-27}$) supera l'energia W necessaria a strappare l'elettrone dal metallo. Perciò determinando la frequenza minima υ_0 alla quale comincia l'emissione elettronica, e quindi la scarica del metallo fortemente caricato di elettricità negativa, si ha

$$W = h\,\upsilon_0$$

L'energia di estrazione può essere valutata in Volt; dire che l'energia di estrazione elettronica per un certo metallo è V Volt significa che per estrarre un elettrone (valore assoluto della carica e) dal metallo e portarlo nelle sue immediate vicinanze occorre il lavoro Ve. Naturalmente se il metallo si trova a un potenziale *elettrostatico* v, e se si vuole estrarre un elettrone e portarlo a distanza, fin dove il potenziale è zero, occorrerà un lavoro totale $(V + v)\,e$. La somma $V + v$ potrebbe chiamarsi *potenziale totale elettronico* del metallo.

Ora appunto *il potenziale V che misura l'energia di estrazione degli elettroni dal metallo è risultato diverso per metalli diversi*; e lo si è potuto determinare nei migliori vuoti oggi raggiungibili, in condizioni da escludere ogni azione chimica, e con superfici fresche ottenute per tagli meccanici fatti nel vuoto su metalli puri.

Il fatto che a metalli diversi M_1, M_2 competono energie di estrazione diverse: $W_1 = eV_1$ e $W_2 = eV_2$ richiede come conseguenza necessaria l'esistenza dell'effetto Volta.

Per chiarire questa connessione ricorrerò a una rappresentazione che si dimostrerà utilissima in tutto il presente studio.

Si faccia corrispondere il metallo a un soluzione di cui il corpo sciolto rappresenti le parti fisse del metallo e il solvente il fluido elettronico. Due metalli diversi saranno rappresentati da due soluzioni diverse, e il metterli in contatto, cioè il rendere possibile il passaggio di elettroni dall'uno all'altro, equivarrà a mettere in comunicazione due soluzioni attraverso a una parete semipermeabile, cioè a una parete che lasci passare liberamente le molecole d'acqua e non quelle del corpo disciolto.

Dimentichiamo, per il nostro scopo, il meccanismo fornito dalla teoria delle soluzioni per spiegare lo stato di essa, e cioè l'assimilazione del soluto a un corpo gassoso che tende a espandersi in un maggiore volume di solvente, e produce i noti fenomeni della pressione osmotica. Consideriamo perciò il fatto empirico del passaggio di acqua dalla soluzione A alla soluzione B (fig. 1) attraverso al setto semi-

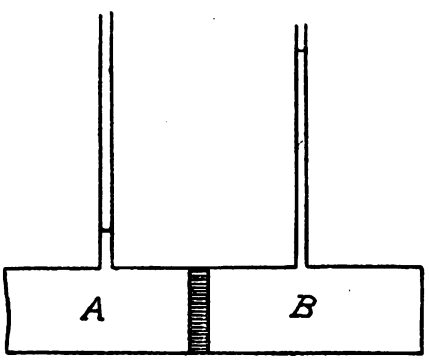


Fig. 1.

permeabile, e dell'equilibrio finale che si raggiunge per un certo dislivello, come il risultato di un'attrazione fittizia della soluzione per il soluto, in quanto questa attrazione è maggiore nella soluzione B che nella A. Avremo con ciò un *modello* di due metalli in contatto, e ai quali spetti energia diversa di vincolamento per gli elettroni.

Come si è detto la soluzione B di maggiore attrazione per l'acqua aspira acqua da A, e nei tubi piezometrici connessi ad A e B si manifesta un dislivello crescente col tempo; a un certo punto la pressione idrostatica in B diventa tanto maggiore di quella in

Digitized by Google

A da arrestare l'ulteriore afflusso di acqua da A verso B.

Tra le due soluzioni si ha allora passaggio indifferente di acqua nei due sensi, ma diversa pressione idrostatica.

Eguale indifferenza di movimento dell'acqua allo stato di vapore si avrebbe fra gli estremi dei tubi piezometrici se riuniti fra loro da un tubo vuoto (figura 2). Il dislivello fra le due superfici libere compensa la diversa pressione di vapore che deriva dal diverso calore interno di vaporizzazione delle due soluzioni.

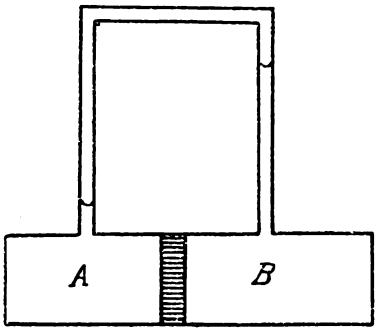


Fig. 2.

L'indifferente passaggio nei due sensi delle molecole d'acqua sia attraverso alla parete semipermeabile sia attraverso al tubo superiore contenente il vapore d'acqua si ottiene perciò, nonostante la differente attrazione delle soluzioni A e B per le molecole d'acqua, in virtù della diversa pressione idrostatica e del diverso livello delle superfici libere.

In modo del tutto analogo se due metalli diversi A e B (fig. 3) sono riuniti in C, il posto del contatto equivale alla parete semipermeabile del caso precedente; il fluido elettronico si sposta dal metallo A di minore a quello B di maggiore energia W di vincolamento elettronico, e il metallo B si carica negativamente. Se le parti affacciate di A e B possono espellere elettroni per emissione termoionica, si ha indifferenza di movimento degli elettroni dall'interno di A all'interno di B o viceversa, sia attraverso alle pareti affacciate (evaporazione elettronica) sia attraverso al contatto C (Richardson). Ma a questa indifferenza di movimento corrisponde un potenziale elettrostatico diverso dei metalli A e B e un campo elettrico tra le parti affacciate, vicine o lontane. Nei due metalli l'elettricità negativa si trova come l'acqua nella fig. 1 e 2; al dislivello idrostatico fa riscontro il diverso potenziale elettrostatico dei metalli della fig. 3.

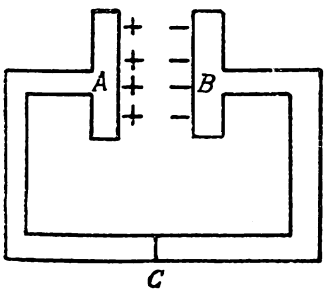


Fig. 3.

La differenza fra i potenziali elettrostatici assunti dai metalli proviene perciò dalla differente energia di estrazione degli elettroni dai metalli diversi. Siano esse $W_1 = eV_1$ e $W_2 = eV_2$; dalle esperienze termoioniche e fotoelettriche si conoscono i valori di W_1 e W_2 o della loro differenza; e se ne deduce il valore di $V_1 - V_2$. *Questa differenza*, secondo le misure di Millikan, *risulta precisamente eguale alla differenza dei potenziali elettrostatici manifestata dall'effetto Volta*, e misurata pure dal Millikan, con le stesse cure, per mezzo del valore del campo elettrico esistente fra i due metalli. La variabilità constatata nei valori dell'energia di estrazione W, ottenuti col metodo termoionico o con quello fotoelettrico, in relazione alle varie condizioni di purezza del metallo e di liberazione dell'atmosfera gassosa superficiale, fa riscontro alla nota mutabilità dell'effetto Volta per le medesime cause. Ma, come per l'effetto Volta, anche nella emissione termoionica e fotoelettrica si è ormai generalizzata l'opinione che ci troviamo di fronte a proprietà intrinseche dei metalli, perturbate ma non create dalle alterazioni superficiali o da contaminazioni gassose.

Procuriamo di rappresentarci, in base a quanto si è detto, lo stato di due metalli prima o dopo il contatto.

Il metallo A (fig. 4) abbia l'energia di vincolamento con gli elettroni W_A; ciò significa che un elettrone per abbandonare il metallo e portarsi nelle sue immediate vicinaze, ma fuori di esso, deve compiere un lavoro W_A. Le cose vanno, perciò, *come se* il metallo fosse circondato da una pellicola doppio-strato di cariche positive e negative, di potenza (prodotto della densità elettrica per lo spessore dello strato) proporzionale a $\frac{W_A}{e}$. Può anche dirsi che per staccare un elettrone dal metallo *allo stato neutro* e portarlo appena fuori di esso bisogna fare un lavoro *come se* il metallo si trovasse al potenziale *fittizio* $V_A = \frac{1}{e} W_A$ e si volesse portare l'elettrone *all'infinito*. Si osservi perciò che questo potenziale *fittizio* che potremo chiamare *potenziale interno* o *fotoelettrico, o intrinseco* non ha nulla da fare col potenziale elettrostatico ordinario del metallo. Quel potenziale interno potrebbe essere, ad esempio, di milioni di Volt se invece di un elettrone di conduzione si dovesse estrarre un elettrone dalla corteccia K di un atomo di Radio.

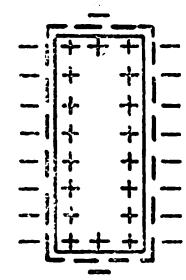


Fig. 4.

Quando un altro metallo B, che ha il suo potenziale interno e la sua corrispondente pellicola doppio-strato, viene portato in contatto con A, nella regione di contatto le due pellicole virtuali si fondono in una, di potenza minore, corrispondente a $V_A - V_B$, perchè delle cariche negative si spostano dall'uno all'altro, e i due metalli assumono due potenziali elettrostatici diversi. Nel nuovo stato permanente spostiamo un elettrone dall'interno di A all'interno di B (fig. 3) seguendo due vie diverse. Una prima volta uscendo dal piatto A, traversando lo spazio interposto tra i piatti, entrando in B. Si avrà un lavoro nullo, poichè la differenza dei lavori di uscita e di entrata nei metalli è compensata dal lavoro per superare il campo interposto tra A e B. Come seconda via si giunga da A a B nell'interno dei conduttori, cioè attraverso al contatto. Si avrà pure lavoro nullo, perchè il doppio strato al contatto ha la funzione dello spazio esterno interposto tra i piatti e compensa la differenza dei potenziali interni di A e B.

Digitized by Google

Nel modello idroosmotico avviene altrettanto. Trasportando una molecola d'acqua attraverso la membrana semipermeabile, si ha un lavoro nullo, perchè si compensano la diversa pressione idrostatica e la diversa attrazione delle due soluzioni per l'acqua. L'acqua può anche passare senza compiere lavoro attraverso al tubo che mette in comunicazione le fasi vapore.

Si osservi che

$$V_A + v_A = V_B + v_B$$

dove V_A e V_B sono i potenziali fotoelettrici o intrinseci, e v_A e v_B i potenziali elettrostatici acquistati dai due metalli dopo il contatto. Abbiamo chiamato la somma $V_A + v_A$ potenziale totale elettronico del metallo A. Si può dire perciò che il contatto tra i due metalli, mentre crea la differenza dei potenziali elettrostatici, e quindi il doppio strato al contatto, eguaglia i potenziali elettronici totali dei due metalli.

I sostenitori della teoria dell'anticontatto, affermando che i due metalli si portano allo stesso potenziale, pensano evidentemente al potenziale elettronico totale.

* * *

2. - *La pila a gas ionizzato.*

Ci proponiamo adesso di stabilire quali rapporti intercedono fra l'esistenza dell'effetto Volta e il funzionamento della pila voltaica. Ma prima di iniziare questa indagine, esamineremo due tipi di pile non idroelettriche, per le quali è più facile stabilire quelle relazioni.

Cominceremo dalla pila a gas ionizzato.

Introduciamo fra i piatti A e B (fig. 3) un gas chimicamente inerte, esempio dell'argon, e ionizziamolo, per esempio con un fascio di raggi X.

Se i piatti fossero di egual metallo non esisterebbe alcun campo elettrico fra A e B; i ioni dei due segni si ricombinerebbero in parte direttamente; gli altri urtando sui piatti cederebbero in misura eguale tanto sull'uno che sull'altro le loro cariche opposte; è il noto fenomeno della ricombinazione dei ioni sulle parti metalliche, ricombinazione che non dà luogo a fenomeni elettrici macroscopici, ma solo a uno sviluppo locale, in forma di calore, dell'energia di ricombinazione dei ioni medesimi.

Ma se i piatti A e B sono di metalli diversi, i ioni positivi, per l'esistente campo elettrico, si muoveranno prevalentemente verso B e i negativi verso A. Una corrente continua di elettroni traverserà il sistema dei due metalli, da A verso B, attraverso al contatto C, e il metallo si riscalderà per il passaggio della corrente. L'energia svolta nel circuito sarà prelevata dall'energia di ricombinazione dei ioni, che in un certo senso riequilibrano le loro cariche attraverso all'intero circuito metallico, mentre senza il campo elettrico fra i due piatti l'energia corrispondente si sarebbe svolta, come calore, localmente sulle facce dei piatti dove avviene le ricombinazione.

Si riconosce da ciò come avvenga che la differenza di potenziale elettrostatica esterna fra i due metalli, la quale non sarebbe di per sè sola capace di alimentare una corrente continua con sviluppo permanente di energia, renda possibile ad una sorgente esterna di energia, quella che ionizza il gas tra i piatti, di funzionare da alimentatrice energetica della corrente. La differenza di potenziale elettrostatico fra i piatti disciplina, in parte, il moto dei ioni, che sarebbe senza di essa pienamente disordinato: ed è tanto necessaria alla produzione della corrente da potersi ben considerare come la causa fisica di essa, pur senza essere la sorgente dell'energia svolta nel circuito.

Una pila come qui è stata descritta non è un semplice schema concettuale, ma può essere realizzata. Così avendo rinchiuso in un tubo contenente 100 millicurie di emanazione, e azoto a pressione ordinaria, due piccole lamine di rame e di zinco affacciate, io ho constatato in un galvanometro che rilega le lamine una corrente notevole, che può essere annullata intercalando nel circuito una forza elettromotrice dell'ordine di grandezza dell'effetto Volta, e opposta ad esso.

* * *

3. - *La pila meccanica.*

I piatti A e B di metalli diversi siano uniti a due fili flessibili del corrispondente metallo, e questi

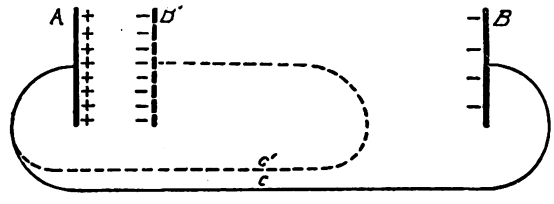


Fig. 5.

siano in contatto permanente nel punto C. Inoltre il piatto B si possa avvicinare fino a B'.

L'esistenza di un campo elettrico permanente fra i piatti A e B richiede che sulle superfici di essi siano distribuite cariche elettriche opposte, le quali diverranno più intense nelle parti prospicienti dei piatti quando questi si avvicinano verso la posizione $A\,B'$. Durante l'avvicinamento si renderà disponibile del lavoro meccanico; inoltre i fili di congiunzione saranno sede di una corrente elettrica e di riscaldamento per effetto Joule. L'origine dell'energia totalmente svolta si ritrova nel fatto che per l'avvicinamento gli elettroni passano da A a B, cioè da un metallo che ha una forza di vincolamento per gli elettroni a uno che ne ha una maggiore.

Essendo V_A e V_B i due potenziali interni o fotoelettrici dei due metalli, l'energia liberata per il passaggio di n elettroni sarà

$$n\,c\,(V_B - V_A) = n\,e\,V$$

dove V è l'effetto Volta. *In questa pila transitoria l'origine dell'energia meccanica e della corrente è perciò tutta nell'effetto Volta.*

Se poi si tornano ad allontanare i piatti, si dovrà eseguire lavoro e il filo sarà percorso da una corrente di senso opposto. Con un moto periodico dei piatti si avranno delle correnti alternate, che possono es-

Digitized by Google

sere raddrizzate da un commutatore comandato dal meccanismo che muove i piatti. Correnti di questo tipo furono ottenute da Majorana; io ne potei accrescere di molto l'intensità immergendo nel mercurio ed estraendo una lamina di alluminio ricoperta di uno strato isolante dello spessore di qualche micron. Naturalmente in queste esperienze il lavoro di produzione della corrente permanente è fatto dal meccanismo motore.

* * *

4. - *Effetto Volta ed effetto Peltier.*

L'analogia idro-osmotica ci dà un modello di grande chiarezza per illustrare ciò che avviene nel passaggio della corrente, al contatto di due metalli diversi.

È parso inconciliabile con la teoria della differenza di potenziale elettrostatico tra i due metalli in contatto l'osservazione seguente. Se esiste al contatto un doppio strato corrispondente alla differenza di potenziale V dell'effetto Volta, l'elettricità q passando dall'uno all'altro metallo dovrebbe sviluppare o assorbire una quantità di energia $q\,V$. L'esperienza ha permesso, in vero, di constatare un assorbimento o uno sviluppo di calore al punto di giunzione (effetto Peltier); ma esso è di un ordine di grandezza oltre mille volte minore di quello prevedibile dando a V i valori normali dell'effetto Volta.

Con questo ragionamento si afferma in fondo che il fenomeno *termico* quale si verifica alla giunzione dei due metalli sia l'unico fatto energetico che si svolge alla giunzione medesima. In realtà le cose vanno diversamente. Corrente elettrica significa circolazione continua di elettroni lungo il metallo; e, al contatto di due metalli diversi, significa passaggio di elettroni da un metallo all'altro.

Sia V la differenza fra i potenziali elettrostatici dei due, la quantità di elettricità q svolge effettivamente sul posto una quantità di energia $q\,V$; ma intanto un numero di elettroni eguale a $\frac{q}{n}$ traversa il contatto e passa perciò da un metallo che ha l'energia di estrazione elettronica $W_1 = eV_1$ a un altro che ha l'energia di estrazione $W_2 = eV_2$; il lavoro qV è l'equivalente di questo mutamento energetico, dovuto al fatto che ognuno degli elettroni assorbe l'energia W_2, per uscire dal secondo e restituire l'energia W_1, entrando nel primo metallo. Non ci può essere quindi uno sviluppo o un assorbimento di calore corrispondente all'effetto Volta V. Solo quando V dipende dalla temperatura T, la termodinamica insegna che si deve avere, per un elettrone,

$$W_1 - W_2 = eV - eT\frac{dV}{dT}$$

e perciò la parte di energia che si manifesterà come calore Peltier sarà $eT\frac{dV}{dT}$ e questa può e suole essere piccolissima rispetto a eV.

Il modello idrosmotico della fig. 6 chiarisce ancora meglio il concetto sovraesposto. Se a sinistra e a destra della parete semipermeabile sono innestati due manometri metallici, si constata che essi rivelano una differenza di pressione eguale alla differenza delle pressioni osmotiche fra A e B. Supponiamo

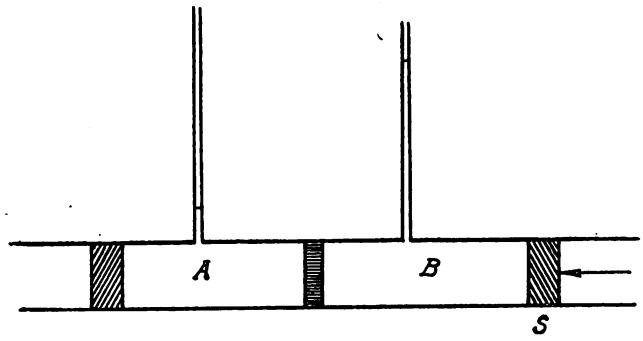


Fig. 6.

che per mezzo dello stantuffo S si eserciti una pressione su B capace di mettere in moto il liquido; solo l'acqua passerà da B in A attraverso al setto semipermeabile. Un idraulico che ignorasse la proprietà semipermeabile del setto si attenderebbe nella parete semipermeabile manifestazioni termiche corrispondenti al prodotto della quantità di acqua circolante per il dislivello delle pressioni manometriche. E invece l'acqua fluisce nel setto come se la differenza di pressione manometrica non esistesse. Il dislivello manometrico e il corrispondente lavoro fatto sullo stantuffo S serve solo per dare all'acqua l'energia necessaria ad abbandonare la soluzione B, che ne è più avida, e passare alla soluzione A, che lo è di meno; non per produrre uno sviluppo locale di calore. L'effetto Peltier è perciò un fenomeno in più, che non può corrispondere alla differenza dei potenziali elettrostatici cioè all'effetto Volta, ma solo alla sua variazione con la temperatura.

* * *

5. - *La pila a elettrolito. Un modello della pila preso dalla fisica delle soluzioni.*

Si immagini che un sistema di due piatti diversi in contatto elettrico sia immerso in una o più soluzioni elettrolitiche, contenenti perciò ioni dei due segni. Si tratti, per esempio, della pila Daniell (rame, solfato di rame, solfato di zinco, zinco). Si avrà una pila che avrà qualche analogia con quella a gas ionizzato. Avviene in essa che sotto l'azione del campo elettrico esistente fra gli elettrodi l'anione SO_4 accorre sul metallo elettrostatico positivo, lo zinco; ma anzichè neutralizzare la sua carica e liberarsi, ne stacca un ione di zinco e resta nel liquido carico come prima. Contemporaneamente il catione metallico, il rame, esce dal liquido e si libera sul catodo pure di rame. Il processo perciò lascia inalterato lo ione SO_4 e tutto si riduce al distacco di un ione Zn dallo zinco e all'entrata di un ione Cu nel rame, *mentre nel circuito esterno, attraverso al contatto dei due metalli due elettroni passano dallo zinco al rame.*

Si riconosce già, anche prima di ulteriori precisazioni, che a un fenomeno, quale si manifesta nel

Digitized by Google

modo indicato, a che si può svolgere esattamente in senso inverso contrapponendo alla pila una sorgente esterna di forza elettromotrice capace di invertire il campo elettrostatico nell'elettrolitico, non può essere completamente estraneo il campo elettrostatico Voltiano proprio degli elettrodi in contatto. I due elettrodi rame e zinco rilegati esternamente producono certamente un campo nel vuoto, e *continueranno a produrlo nel dielettrico costituito dal solvente*; questo campo potrà essere perturbato dagli eventuali altri campi che possono formarsi al contatto dell'elettrolito, cogli elettrodi; ma se, come avviene nella pila Daniell chiusa in corto circuito, la differenza di potenziale regnante nel liquido è poco diversa da quella che i due elettrodi produrrebbero nel vuoto, o nel solo dielettrico, ciò vuol dire che il campo elettrico voltiano ha una parte notevole nel meccanismo di funzionamento della pila. Solo le pile di concentrazione, con elettrodi eguali fra loro, e costituiti col metallo che trovasi in soluzione, possono avere un funzionamento cui è certamente estraneo l'effetto Volta degli elettrodi.

Ma più chiare illustrazioni sul meccanismo di funzionamento della pila e sulla importanza che ha in tale meccanismo l'esistenza dell'effetto Volta, ci saranno fornite da un modello della pila che ne riproduce con singolare corrispondenza tutte le caratteristiche teoriche e sperimentali.

Abbiamo già rappresentato un metallo con una soluzione, facendo corrispondere il corpo sciolto agli atomi-ioni del metallo e le molecole d'acqua agli elettroni. Spingendo più avanti la rappresentazione empirica paragoneremo un metallo immerso in una soluzione di un suo sale a una soluzione satura in contatto col corpo disciolto. I ioni positivi interni del metallo corrispondono alle molecole del soluto, gli elettroni di conduzione del metallo corrispondono alle molecole del solvente, per esempio alle molecole d'acqua; infine l'elettrolito con cui il metallo è in contatto sarà il soluto nella fase solida presente in soluzione. Il metallo può guadagnare o perdere solo elettroni in contatto con altri metalli o nel vuoto; può guadagnare o perdere solo ioni metallici, e cioè ioni positivi, attraverso all'elettrolito; così come la soluzione può perdere o guadagnare solo acqua in contatto con altre soluzioni attraverso a un setto semipermeabile o al vuoto; può perdere o guadagnare solo molecole del soluto in contatto con la fase solida di questo.

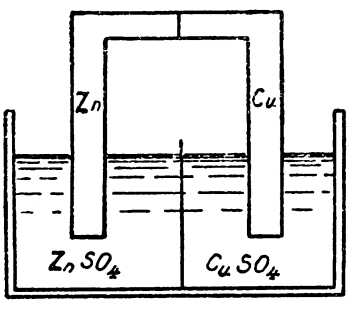


Fig. 7.

La combinazione rame, solfato di rame – solfato di zinco – zinco della pila Daniell (fig. 7) corrisponderà perciò a quella rappresentata dalla fig. 8.

In un tubo circolare sono due soluzioni sature, di due corpi A e B, separate in π da un setto semipermeabile fisso e in S da uno stantuffo mobile; sulle due facce di S sono addensati i corpi A e B allo stato solido, così da mantenere sature le corrispondenti soluzioni anche durante il lento moto dello stantuffo.

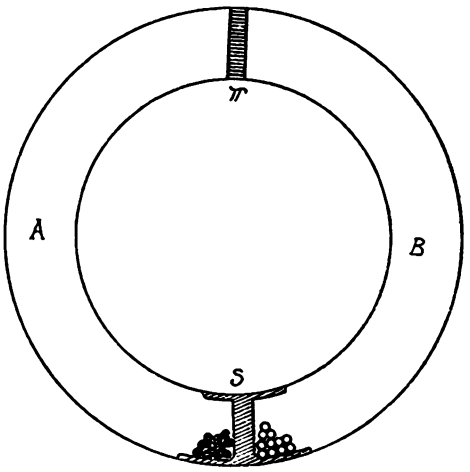


Fig. 8.

Sullo stantuffo S graveranno le due pressioni osmotiche diverse delle soluzioni, ed S si muoverà; al moto di S, per esempio verso sinistra, corrisponde una circolazione d'acqua pura attraverso al setto semipermeabile; una diminuzione di volume della soluzione A, con deposito del soluto A, e un aumento del volume della soluzione B con dissoluzione del soluto B. Il processo è continuo, fino a che lo stantuffo S nel suo moto raggiunge il setto π, cioè fino a che sparisce la soluzione A; naturalmente se è disponibile una sufficiente quantità di soluto B. Un bagno in cui è immerso tutto l'apparecchio provvede a mantenere costante la temperatura.

In perfetta corrispondenza con il modello, nella pila della fig. 8 gli elettroni circolano, fuori della pila, dallo zinco al rame, attraverso al contatto, che, come abbiamo visto al N. 2, funziona da setto semipermeabile; corrispondentemente lo zinco si distrugge passando allo stato di ioni Zn nel liquido, mentre il rame dallo stato di ione Cu si deposita come metallo sulla lastra di rame, e ciò fino a che c'è zinco e solfato di rame disponibili. La differenza di pressione idrostatica tra A e B corrisponde, come abbiamo detto alla differenza dei potenziali elettrostatici tra Zinco e Rame.

Perchè l'analogia con la pila sia più prossima immagineremo che come la formazione di rame da ioni ed elettroni è una reazione esoenergetica, lo sia anche la formazione della soluzione; e perciò la dissoluzione senza lavoro osmotico, cioè quella che si studia al calorimetro, sia esotermica in virtù di una reazione chimica fra il solvente e il soluto: esempio l'acqua e i sali di calcio.

E allora l'origine del lavoro di circolazione dell'acqua nel model lo sarà la differente energia di formazione dell'unità di volume delle due soluzioni, e precisamente il cosiddetto calore di dissoluzione con lavoro osmotico. La parte di questa energia di formazione che corrisponde alla produzione di lavoro risulta dalla teoria eguale alla differenza delle

Digitized by Google

pressioni osmotiche delle due soluzioni, ciò che del resto si ottiene anche direttamente dalla considerazione del modo di funzionamento dell'apparecchio.

Analogamente per la pila entreranno in gioco i diversi potenziali interni (fotoelettrici) dei due metalli e la variazione di energia al contatto degli elettrodi con l'elettrolito, per il passaggio dello ione *Zn* in soluzione, e per quello dello ione *Cu* sul metallo. L'energia complessivamente disponibile sarà data da quella propria della formazione di un certo peso di rame neutro, partendo da ioni *Cu* che entrano dalla soluzione, e da due elettroni che entrano dal contatto bimetallico, diminuita dell'energia di formazione corrispondente di un peso equivalente di zinco neutro. Naturalmente queste energie di formazione del metallo non son da confondere col potenziale di ionizzazione doppia dell'atomo isolato.

L'analogia è ulteriormente seguibile. Se si apre il tubo della fig. 8 al posto del setto π, lasciando liberi gli estremi, le pressioni idrostatiche si equilibrano, e cessa la circolazione d'acqua. Così staccando i due metalli dalla pila al posto del contatto, il campo elettrico dentro l'elettrolito si annulla e il moto dei ioni si arresta. E come le due parti superiori e separate *A*, *B* del tubo potrebbero comunicare attraverso a un tubo contenente la fase vapore, che ricostituirebbe la circolazione, così una evaporazione elettronica fra *Zn* e *Cu*, tenuti per esempio nel vuoto e ad alta temperatura, ricostituirebbe la corrente, poichè questa comunicazione, come si è detto, equivale a un contatto.

Ancora : se nel tubo della fig. 8 si fa una chiusura orizzontale tanto in *A* che in *B*, al di sopra si avrà la differenza di pressione idrostatica creata dal setto semipermeabile, al di sotto le pressioni liquide saranno all'incirca egualizzate dallo stantuffo mobile *S*. Si riconosce da ciò la funzione essenziale del setto semipermeabile, che crea e tende a mantenere la differenza di pressione idrostatica, mentre lo stantuffo mobile tende ad annullarla, donde la circolazione continua per la contrapposizione dei due.

Analogamente se si taglia orizzontalmente la parte superiore della coppia bimetallica, in alto si avrà la differenza di potenziale elettrostatica di Volta, in basso, fra i tronconi di *Zn* e di *Cu* si avrà una differenza di potenziale elettrostatica molto minore. Può perciò a buon diritto affermarsi che il contatto dei metalli tende a mantenere la differenza dei potenziali elettrostatici ; la immersione nel liquido tende a diminuirla, e che perciò l'equilibrio è turbato e si determina la corrente continua. *È l'interpretazione di Volta.*

Naturalmente ciò non esclude che la f. e. m. della pila sia alquanto diversa dall'effetto Volta nel vuoto. Il valore esatto di *E*, in virtù dell'applicazione dei due principi della Termodinamica deve corrispondere alla variazione totale della energia libera che ha luogo *nel totale circuito*, secondo la formula di Gibbs-Helmholtz, la quale non può essere contraria all'interpretazione sintetica data sopra, poichè è indipendente da ogni ipotesi sul meccanismo di produzione della corrente.

Nel caso della pila Daniell, per la quale è piccolo il termine correttivo termico di Helmholtz, la valutazione dell'energia $2Ee$ liberata per il passaggio di due elettroni, cioè per lo spostamento nell'elettrolito di un ione metallico bivalente, può farsi nel modo che segue.

Sia W_{Zn}^{-} il lavoro di estrazione fotoelettrico di un elettrone dallo zinco, e W_{Cu}^{-} quello del rame ; la liberazione di energia al contatto per il passaggio di due elettroni dallo zinco al rame sarà $2\,(W_{Cu}^{-} - W_{Zn}^{-})$, trascurando l'effetto Peltier.

Al contatto rame-solfato di rame avviene il passaggio dello ione *Cu* dal liquido al rame, con sviluppo di una quantità di energia libera che chiameremo W_{Cu}^{+}.

Lo stesso dicasi per lo zinco, che svolgerà, per il passaggio dello ione *Zn* nel liquido, la quantità di energia libera $-W_{Zn}^{+}$.

Avremo perciò in totale

$$2Ee = 2W_{Cu}^{-} + W_{Cu}^{+} - (2W_{Zn}^{-} + W_{Zn}^{+}) \qquad (1)$$

Si può così avere *E*, f. e. m. della pila, come un rapporto caratteristico di essa, presa globalmente, tra l'energia elettrica totalmente svolta nel circuito e la quantità di elettricità passata.

Procuriamo adesso di distribuire *E* fra i vari contatti che hanno sede nel circuito. Si noti intanto che la (1) può mettersi sotto la forma

$$E = \frac{1}{2e}(W_{Cu}^{+} - W_{Zn}^{+}) + \frac{1}{e}(W_{Cu}^{-} - W_{Zn}^{-})$$

Ma l'ultimo termine è l'effetto Volta *V*. perciò

$$E = V + \frac{1}{2e}(W_{Cu}^{+} - W_{Zn}^{+}) \qquad (2)$$

Se, come avviene nell'elemento Daniell, la f. e. m. della pila è assai vicina all'effetto Volta fra gli elettrodi, ciò significa che W_{Cu}^{+} e W_{Zn}^{+} sono poco diversi fra loro, e cioè che le energie liberate per il passaggio dello ione dal metallo alla soluzione si compensano in parte nei due elettrodi ; o anche che *il grosso del lavoro della pila è dato dal passaggio degli elettroni dallo zinco al rame.*

Questo risultato non deve sorprenderci.

Occorre infatti chiarire un punto di importanza notevole.

L'elettricità può passare da un metallo all'altro solo allo stato di elettroni ; da un metallo ad un elettrolito solo allo stato di ioni metallici. Ma una proprietà è comune a tutti i passaggi. In ogni caso se per estrarre l'unità di carica dal corpo *A* occorre il lavoro L_A e per estrarla da *B* occorre il lavoro L_B, mettendo *A* e *B* in contatto ha luogo uno spostamento di cariche fino a che sorge tra i due una differenza di potenziale elettrostatica $V = L_A - L_B$ (1). Ne risulta una conseguenza importante. A ogni contatto dove esiste dalle due parti una diversa energia di vincolamento per l'elettricità, esiste anche certamente una differenza di potenziale elettrostatica, cioè un campo elettrico esterno, e un doppio strato al contatto, equivalente alla differenza di energia; e

Digitized by Google

viceversa a ogni contatto ove si constata tra le due parti una differenza di potenziale elettrostatica con un campo elettrico esterno, esiste una differenza di energia di vincolamento per l'elettricità dalle due parti medesime, e quindi, in un certo senso, una sorgente (positiva o negativa) di energia per il passaggio di elettricità attraverso al contatto. *Da questo lato nessuna differenza può farsi fra ciò che avviene in ciascuno dei tre contatti principali della pila.*

Pertanto se le grandezze W^+_{Cu} e W^+_{Zn}, (variazioni di energia libera per il passaggio di un ione dal metallo al liquido), sono diverse da zero, esisterà una differenza di potenziale equivalente fra metallo e liquido e un campo elettrico esterno fra loro; e inoltre poichè esiste certamente la differenza di potenziale elettrostatica fra i due metalli al contatto, e cioè il campo elettrico esterno, esisterà certamente al contatto una sede di variazione di energia, metallo-elettronica, per il passaggio di elettroni da un metallo all'altro. Sola differenza fra i tre contatti è la diversa natura del centro elettrico che li può traversare: l'elettrone al contatto bimetallico, lo ione metallico ai due contatti con l'elettrolito; ma tutti e tre, con le rispettive variazioni energetiche, e i corrispondenti doppi strati che ne derivano, sono efficaci a determinare la corrente; cosicchè non è per nulla giustificato dimenticare il primo e guardare solo agli altri due. *La corrente deriva dal fatto che la somma algebrica delle potenze dei tre doppi strati non è nulla.*

Considerando la formola (1) abbiamo detto che essendo E vicino a V, risulta che W^+_{Cu} e W^+_{Zu} sono vicini fra loro; ma potrebbero ciascuno, essere molto grandi o molto piccoli; a W^+_{Cu} e a W^+_{Zu} corrispondono le differenze di potenziale metallo-liquido, che Volta considerava molto piccole, ciò che non è necessario, poichè solo la differenza interviene nel valore di E.

Tali differenze di potenziale possono pure considerarsi, come nella formula di Nernst, dipendenti dalla concentrazione dei ioni metallici nella soluzione. Esse dovrebbero però essere misurate *elettrostaticamente*, non con i metodi soliti della elettrochimica *i quali trascurano deliberatamente i salti di potenziale elettrostatico ai contatti dei metalli* e sono sempre soggetti alla incertezza della determinazione del punto zero dei potenziali assoluti metallo-elettrolito.

La conoscenza della differenza di potenziale elettrostatica fra Cu e $CuSO_4$, darebbe W^+_{Cu} e analogamente per lo zinco. E allora, avendosi dai dati fotoelettrici anche $2\,W^-_{Cu}$ si potrebbe ricostituire il totale lavoro di formazione della miscela-ioni metallici, elettroni che costituisce il metallo neutro. Questi dati fornirebbero per differenza fra rame e zinco la f. e. m. della pila Daniell.

Si giunge nella ordinaria teoria della pila Daniell a un valore esatto della f. e. m. considerando invece la variazione di energia per la formazione del solfato di zinco e la scomposizione del solfato di rame, e quindi la differenza dei rispettivi calori di formazione (Zn, O, SO_3, acqua), e (Cu, O, SO_3, acqua) determinati dal Thomsen. Ma si fanno con ciò intervenire degli elementi del tutto estranei allo effettivo funzionamento della pila, che è praticamente indipendente dalla presenza del radicale acido SO_4; quegli elementi estranei si eliminano, naturalmente, nell'eseguire la differenza fra i due calori di formazione.

Se, però, invece di solfati si trattasse, a esempio di nitrati, o in genere di sali qualunque, occorrerebbe ogni volta, per il calcolo della f. e. m., ricorrere ad altre esperienze termochimiche, pure ottenendosi, come è noto per la legge di Hess, lo stesso numero come differenza dei calori di formazione dei sali acquosi omologhi di Cu e di Zn.

Assai più semplicemente la teoria elettronica prende in considerazione le energie di formazione degli elettrodi che non dipendono dalla natura del radicale acido, ma solo e in piccola parte dalla concentrazione dei ioni metallici nella soluzione. La stessa semplificazione e unificazione concettuale si ha del resto nella teoria di Nernst, nella quale interviene solo la pressione di soluzione del metallo e la pressione osmotica dei ioni metallici nella soluzione; mentre non entra in conto la presenza dell'anione acido.

6. - A questa interpretazione, che inverte l'importanza relativa attribuita comunemente al contatto bimetallico e ai contatti con gli elettroliti, si potrebbe obiettare che il metallo rame si fabbrica, bensì, con ioni metallici che vengono dall'elettrolito e con elettroni che vengono dal contatto bimetallico; ma che la costituzione del metallo neutro avviene in definitiva al contatto con l'elettrolito. Ma se ciò fosse a questo contatto si dovrebbe trovare la differenza di potenziale elettrostatica corrispondente all'energia globale di formazione $W^+_{Cu} + 2\,W^-_{Cu}$ che chiameremo Ω_{Cu}, e al contatto Zn — $Zn\,SO_4$ si avrebbe la differenza di potenziale corrispondente a Ω_{Zn}; dalla loro combinazione sorgerebbe la f. e. m. totale E.

Ora, per le considerazioni già svolte le differenze di potenziale di cui stiamo parlando sono quelle elettrostatiche, cui corrisponde perciò un campo elettrico esterno. Ma se in una pila, per esempio, una Daniell, gli elettrodi di rame e di zinco sono prolungati in due piatti pure di rame e zinco formanti un condensatore, questo si carica poco; e cioè solo fino alla differenza fra 1,06 volt (f. e. m. totale della pila) e l'effetto Volta zinco-rame (circa 0,8 volt). Se fra i due elettrodi, a pila aperta, si ha una così piccola differenza di potenziale elettrostatica, sarà pure piccolo il contributo dato dai contatti liquido-metallo, e liquido-liquido alla f. e. m. totale.

Si noti inoltre che quando constatiamo la formazione di *metallo neutro* dove si deposita il rame, ciò non significa che si sono depositati *atomi neutri*, poichè anzi è ben probabile che nel metallo esistono solo ioni positivi, privi degli elettroni di valenza, e una fitta nube interna di elettroni di conduzione; cosicchè nel costituire il metallo neutro può ben avvenire che lo ione positivo metallico entri dall'elettrone e *resti tale*, ciò allo stato di ione, mentre gli elettroni entrano dal contatto bimetallico e si mescolano alla nube elettronica.

Sono pertanto quattro le grandezze che caratterizzano il funzionamento della pila; contributo ionico W^+_{Cu} e contributo elettronico $2\,W^-_{Cu}$ relativi al

(1) Si suppone che V non dipenda dalla temperatura.

Digitized by Google

rame ; e i due elementi analoghi relativi allo zinco. La parte 2 $(W_{\overline{Cu}} - W_{\overline{Zn}}) = 2\ e\ V$ dove V è l'effetto Volta non può essere fornito che dall'efflusso elettronico, come risulta anche dal fatto che nella pila meccanica del n. 4 un lavoro equivalente a V è compiuto appunto, ed esclusivamente, dallo spostamento di elettroni, poichè manca l'elettrolito. Solo il resto del lavoro, $W^+_{Cn} - W^+_{Zn}$, può nella pila idroelettrica essere fornito dall'elettrolito, e perciò, essendo V molto vicino a E, la quasi totalità del lavoro ottenuto spetta all'assorbimento di elettroni che il rame compie dallo zinco, cioè alla stessa causa dell'effetto Volta, mentre in gran parte si compensano i lavori di spostamento dello ione metallico. È il risultato apparentemente paradossale che avevamo enunciato.

* * *

7. - Conclusione.

Accertata l'esistenza dell'effetto Volta anche nel vuoto, e perciò indipendentemente da ogni azione chimica, la coppia bimetallica, ad esempio Rame-Zinco, costituisce un mezzo naturale e perpetuo atto a produrre in uno spazio anche di grandi dimensioni un campo elettrostatico ; così come un magnete permanente (però con minore stabilità) crea intorno a sè un campo magnetico. La origine dell'energia di questo campo elettrostatico è puramente fisica ; essa deriva dalla diversa energia di vincolamento degli elettroni di conduzione ai diversi metalli.

Nella pila a ionizzazione che si ottiene immergendo una coppia bimetallica in un gas ionizzato il campo elettrostatico dovuto all'effetto Volta produce una corrente permanente senza fornire energia propria, ma in quanto esiste una sorgente esterna di energia. In tal caso il campo elettrostatico determina semplicemente, senza eseguire lavoro, un disciplinamento direttivo del moto dei ioni, e quindi una corrente nel filo che unisce i due piatti ; l'energia è quella di ricombinazione dei ioni. Ma il campo non può essere trascurato o ignorato. Anche in una dinamo Pacinotti a magnete permanente la corrente è prodotta per virtù del lavoro meccanico esterno, ma il campo induttore è condizione indispensabile a che quel lavoro diventi energia elettrica.

Nelle pile idroelettriche il compito dell'effetto Volta è assai più importante ; così nella pila Daniell l'energia è prodotta per virtù della formazione del rame neutro e della distribuzione dello zinco neutro ; e, come si è visto, in questo processo si deve ritenere che la maggior parte del lavoro ottenuto sia dovuto al passaggio elettronico, e la maggior parte della f. e. m., abbia sede al contatto dei due metalli diversi.

Il caso estremo si ha nella pila meccanica, dove lo spostamento elettronico da solo può produrre lavoro elettrico e lavoro meccanico. Basta pensare a due dischi di rame e di zinco neutri di notevole superficie, situati a distanza e rilegati da un filo. Per il loro avvicinamento si produrrà una corrente e un lavoro meccanico di attrazione, dovuti al fatto che degli elettroni abbandonano il disco di zinco per accorrere a quello del rame. La piccolezza della capacità elettrostatica limita la possibilità di afflusso di un gran numero di elettroni ; ma se su un blocco di rame si fanno accorrere insieme elettroni da una parte e ioni positivi dall'altra così da lasciare immutato il potenziale elettrostatico, le correnti e le energie ottenute possono diventare molto maggiori. È questo che in fondo avviene nella pila idroelettrica. Ecco perchè la spiegazione del funzionamento della pila sulla base dell'effetto Volta non può condurre a contraddizioni sostanziali, e va anzi considerata come scientificamente corretta.

Chiarite così le divergenze intorno alla teoria del contatto, l'opera di Volta, che fu guidato da quella sua teoria alla scoperta fondamentale del campo elettrostatico proprio di una coppia bimetallica e a quella della pila elettrolitica, ci appare come illuminata da una intuizione geniale e divinatrice. Essa si impone ancora oggi alla nostra riverente ammirazione, pur dopo un secolo fecondo di grandi scoperte, che hanno a varie riprese sconvolte, rinnovate le teorie della Fisica.

Digitized by Google

Digitized by Google

ING. PROF. FERDINANDO LORI

R. SCUOLA D'INGEGNERIA DI PADOVA

LA CORRENTE ELETTRICA E L'ELETTROMAGNETISMO

Digitized by Google

Digitized by Google

La corrente elettrica si è rivelata all'uomo per mezzo della sua azione sui muscoli, sui nervi e sugli organi dei sensi. Alessandro Volta, prima di costruire il suo *organo elettrico artificiale*, durante tutto il lungo periodo di osservazioni e di esperienze, che precedette la grande scoperta, aveva applicato l'arco bimetallico a muscoli e nervi di animali di varia specie, alla sua lingua, ai suoi occhi, ai suoi orecchi, per osservare le contrazioni, il sapore acido od alcalino, il bagliore, il bruciore ed altre manifestazioni del genere.

Tostochè fu divulgata la notizia della scoperta della pila, scienziati, medici e dilettanti di ogni Paese vollero riprodurne esemplari, variando il numero, la superficie e la forma degli elementi. Fisici e chimici investigarono specialmente i fenomeni termici e chimici, di cui i principali, compreso l'arco luminoso fra punte di carbone, furono osservati ed esaminati entro un solo biennio: i medici si occuparono di preferenza delle azioni della corrente sugli organismi. L'entusiasmo e lo zelo della ricerca nel nuovo campo furono grandissimi, perchè la corrente della pila, oltrechè un mezzo potente per investigare la natura dei corpi, apparve un rimedio efficace di malattie ritenute fino allora incurabili, non escluse alcune forme di demenza. In realtà mentre le speranze che vi avevano concepito fisici e chimici superarono rapidamente qualunque previsione, quelle dei medici furono per la maggior parte deluse.

Le osservazioni di quel periodo fino al 1819 si limitarono ai fenomeni che si manifestano lungo il circuito nei corpi che lo costituiscono: nessun cambiamento fu scoperto in corpi, che col circuito non fossero in contatto materiale diretto, fino al giorno in cui Giovanni Cristiano Oersted a Copenhagen ebbe fatto la sua classica esperienza di elettromagnetismo.

Qualche raro accenno a fenomeni magnetici della corrente, che si trova nella letteratura scientifica precedente, e cui ora accenneremo brevemente, non si può considerare come un' anticipazione della scoperta del fisico Danese.

Era stata fatta più volte l'osservazione di cambiamento di polarità in aghi calamitati avvenuta durante temporali, ed era stata attribuita a scariche atmosferiche. Il fisico Arago aveva udito da un testimonio oculare il racconto di un errore di rotta di un capitano, che guidava un vascello in prossimità di Algeri, il quale errore si riconobbe doveva attribuirsi a rovesciamento spontaneo di polarità dell'ago della bussola. Poco prima quel vascello aveva subito una tempesta con scariche elettriche. Era stato affermato che le punte di un parafulmine possono divenire magnetiche per effetto dell'elettricità che vi si scarica. Sembra che fosse il primo il Beccaria nel 1777 a fare l'esperimento di inviare una scarica elettrica tratta da macchina elettrostatica attraverso un ago di acciaio, osservandovi il formarsi in esso di una *curiosa* polarità.

Gian Domenico dei Romagnosi nel 1802 osservò deviazioni nell'ago di una bussola quando egli lo toccava con una estremità di una *catena galvanica*, collegata per l'altra estremità al polo di una pila a colonna. Egli descrisse il fenomeno, che aveva creduto di osservare, in un giornale, che si stampava a Trento (Ristretto di foglietti universali stampato dal Monanni N. LXII). Giovanni Aldini, il nepote del Galvani, in un'opera intitolata: *Essai théorique et expérimental sur le galvanisme* (vol. 1°, p. 339-340) racconta che il Sig. Mojon a Genova magnetizzava aghi di acciaio facendoli percorrere da corrente elettrica ed aggiunge:

« Cette nouvelle propriété du galvanisme a été constatée par d'autres observateurs et dernièrement par M. Romanesi (il Romagnosi), physicien de Trente, qui a reconnu que le galvanisme faisait décliner l'aiguille aimantée ».

Probabilmente questa notizia ha fatto diffondere in una certa epoca l'opinione che il Romagnosi si potesse considerare come predecessore dell'Oersted, e quindi anche l'elettromagnetismo potesse considerarsi di origine Italiana. Tale opinione p. es. si trova enunciata da W. B. Taylor in un discorso storico su Giuseppe Henry (*A memorial of Joseph Henry*, Washington, 1880, p. 213). Ma in realtà chi legge l'articolo del Romagnosi non può riconoscere in lui il precursore dell'elettromagnetismo: egli toccava l'ago con parti del circuito della pila, nè sospettava menomamente l'influenza della corrente elettrica a distanza.

Lo stesso Aldini nel 1804 preparò una pila a colonna, forata a guisa di un pozzo elettrico, e vi collocò dentro aghi di acciaio presumendo che si magnetizzassero, ma non ebbe alcun risultato sicuro.

Il Desorme nel 1805 sospettò che una pila potesse

Digitized by Google

aver tendenza ad assumere una determinata orientazione per effetto del campo magnetico terrestre, e sperimentò con molta attenzione. Insieme con lo Hatchett costruì un piccolo galleggiante, che potesse facilmente scorrere e girare su sè stesso anche per minime coppie che tendessero a cambiarne l'orientazione: vi collocò sopra una calamita, il cui peso era uguale a quello della pila, che vi avrebbe collocato in seguito: osservò che la calamita aveva la virtù di far ruotare il galleggiante obbedendo al campo terrestre: ripetè l'esperimento sostituendo alla calamita la pila, ma il risultato non fu secondo le sue previsioni.

Finalmente si deve ricordare un'affermazione del Ritter, secondo la quale un ago composto di rame e di argento si dovrebbe disporre spontaneamente nel piano del meridiano magnetico: i metalli con cui egli aveva fatto questa esperienza erano esenti da ferro?

Egli è che molti fisici pensavano ad analogie, e quindi reciproche azioni fra elettricità e magnetismo, ma il fenomeno fondamentale, col quale queste relazioni si mettono in evidenza, per quanto semplice, e tale che può essere riprodotto con grande facilità e con modestissimi mezzi, i quali subito dopo la scoperta del Volta non solo non mancavano, ma erano entrati nel dominio più familiare di tutti gli studiosi, fu scoperto soltanto vent'anni dopo la pila.

Lo stesso Oersted, cui spetta questa gloria, dirigeva da molto tempo il suo pensiero sui rapporti fra forze elettriche e magnetiche. Un cenno di quest'orientazione del suo intelletto si trova nel cap. VIII della sua Opera: *An inquiry into the identity of chemical and electrical forces*. Ma le prime osservazioni del fenomeno elettromagnetico sembra appartengano alla fine del 1819. Egli poi mostrò gli esperimenti relativi ai suoi allievi in una lezione della primavera del 1820, e ne informò il mondo scientifico con una relazione avente per titolo: *Experimenta circa effectum conflictus electrici in acum magneticam*, di cui mandò varii esemplari ai redattori della *Biblioteca universale*. La data della memoria, di circa 1300 parole, è il 31 luglio 1820, cui pertanto deve riferirsi l'origine dell'elettromagnetismo. Traduzioni nelle principali lingue europee tosto comparvero nei più importanti periodici di scienze: in italiano nel *Giornale di fisica chimica e storia naturale* di Pavia (tomo III, serie II) lo stesso anno 1920. In francese essa fu riprodotta negli *Annales de chimie et physique* di Gay Lussac ed Arago con una nota, che merita di essere ricordata, perchè Arago sente il bisogno di avvertire con essa i lettori come nel suo periodico non venissero mai accolti annunzi di scoperte non controllate, mentre quella dell'Oersted meritava fede, sia perchè i risultati vi apparivano accompagnati da molti dettagli, sia perchè egli stesso aveva avuto occasione a Ginevra di assistere ad una riproduzione del fenomeno elettromagnetico fatta dal De la Rive in presenza di Prevost, Pictet, de Saussure, Marcet, de Candolle.

Nella memoria il fenomeno fondamentale della deviazione dalla posizione di equilibrio naturale di un ago calamitato, quando vi si trova vicino un filo parallelo percorso dalla corrente di una pila Voltiana, è accompagnato da considerazioni, che non lasciano dubbio sull'interpretazione, che ne faceva lo scopritore, di un'azione esterna al circuito. Anzi tale interpretazione, evidentemente assai cara all'Autore, con parole diverse si trova in principio e verso la fine della memoria, come se l'Oersted ne avesse avuto un'intuizione preventiva, e considerasse il suo esperimento come una conferma di verità intuita. In principio si trova il periodo seguente:

« Effectui autem, qui in hoc conductore et in spatio circumstante locum habet, conflictus electrici nomen tribuemus ».

E verso la fine:

« Conflictum electricum in conductore non includi, sed, ut iam diximus, simul in spatio circumiacente, idque satis late dispergi, ex observationibus iam propositis satis patet ».

Vi è anche fatto cenno di quelle più tardi denominate linee di forza magnetica, che accompagnano il circuito, alle quali egli nel caso della corrente rettilinea attribuisce la forma di spirali.

Finalmente vi è riferita l'osservazione che il confiitto elettrico attraversa tutti i corpi non magnetici. Quando esso incontra un corpo magnetico le sue particelle gli oppongono resistenza, e da questa nasce *ut impetu virium certantium moveri possint*.

Oersted continuò per breve tempo gli studi nel campo da lui aperto: nel primo semestre 1821 pubblicò nel *Philosophical Magazine* (vol. 57) una memoria, in cui riferisce di esperienze istituite per mettere in evidenza l'azione opposta a quella della corrente sui magneti, che questi a lor volta debbono esercitare sul circuito della corrente. « Poichè, egli dice, nessun corpo può metterne in moto un altro senza esser messo in moto a sua volta, se possiede la richiesta mobilità, facilmente si prevede che il magnete deve mettere in moto l'arco galvanico » (il conduttore con cui si chiude il circuito della pila).

Dopo quella data non risulta che egli abbia eseguito altre ricerche, nè comunque abbia cercato di misurare le grandezze in gioco nel fenomeno, cui aveva ormai legato il suo nome.

Subito dopo la scoperta di Oersted si manifestò un fenomeno storico opposto a quello precedente. Avevano dovuto trascorrere venti anni perchè la corrente elettrica rivelasse sia pur qualitativamente la sua veste magnetica: fu sufficiente un bimestre perchè fossero gettate le fondamenta di tutta la teoria dell'elettromagnetismo e dell'elettrodinamica. Il principale artefice fu Andrea Maria Ampère: debbono essere associati al suo in modo speciale i nomi di Arago, di Laplace, di Biot et Savart.

L'opera di Ampère nasce da un mirabile connubio di abilità sperimentale e di sicurezza nell'indagine matematica. Essa si sviluppò di getto durante i mesi di settembre, ottobre, novembre 1820, ed egli ne dette resoconto all'Accademia di Parigi nelle successive sedute del 18, 25 settembre, del 9, 16, 30 ottobre e del 6 novembre. Due memorie sistematiche

Digitized by Google

contenenti tutto il pensiero di Ampère sul nostro argomento comparvero nel *Recueil d'observations éléctrodinamiques*, pubblicato nel 1822.

Nell'ordine qualitativo appartengono all'Ampère la verifica dell'azione, che sull'ago calamitato esercita anche il circuito interno della pila, e quindi la corrente attraverso gli elettroliti: la proposta di costruire spirali elettromagnetiche con effetti magnetici identici a quelli dei magneti cilindrici permanenti: l'idea di compensare in una spirale elettromagnetica l'azione longitudinale con un conduttore rettilineo disposto secondo l'asse della spirale per il ritorno della corrente: il concetto dell'equivalenza delle linee, che accompagnano il circuito, a quelle, che in un magnete congiungono i poli: i primi esperimenti di azioni elettrodinamiche fra circuiti percorsi da corrente: la verifica dell'azione del campo magnetico terrestre sopra un tratto di circuito mobile.

L'Ampère considerò la corrente elettrica come l'insieme dei movimenti in senso contrario delle opposte elettricità. Egli anche distinse nettamente lo stato dell'elettricità nella pila a circuito aperto da quello nella condizione di circuito chiuso. Adoperò a tal fine nomi diversi, perchè chiamò il primo stato di tensione: il secondo stato di corrente. Nel primo caso le due elettricità di nome contrario sono spinte verso i poli, dove si accumulano, finchè la tensione che vi assumono non equilibra la forza che le sospinge. A circuito chiuso le elettricità si mettono in moto per effetto della loro tensione, ed il moto si accelera finchè l'inerzia dei filetti elettrici, e la resistenza che essi incontrano anche nei migliori conduttori, non annulla l'accelerazione. Dopo quel momento continuano i moti uniformi.

« Questo moto di elettricità in una serie di corpi elettromotori e conduttori, egli aggiunge esplicitamente, io chiamerò corrente elettrica, e sottintenderò, per evitare una ripetizione fastidiosa, dopo le parole: senso di corrente elettrica: queste altre: dell'elettricità positiva. Perciò quando p. es. si tratta di una pila voltaica, direzione della corrente elettrica nella pila designerà la direzione, che va dall'estremità, dove nel caso della decomposizione dell'acqua si sviluppa l'idrogeno, a quella, dove si ottiene l'ossigeno: e l'espressione: direzione della corrente elettrica nel conduttore, che stabilisce la comunicazione fra le estremità della pila designerà la direzione, che va al contrario dall'estremità, dove si produce l'ossigeno, a quella, dove si sviluppa l'idrogeno ». Con queste precise parole Ampère introduce nell'interpretazione del fenomeno della corrente elettrica l'ipotesi dualistica.

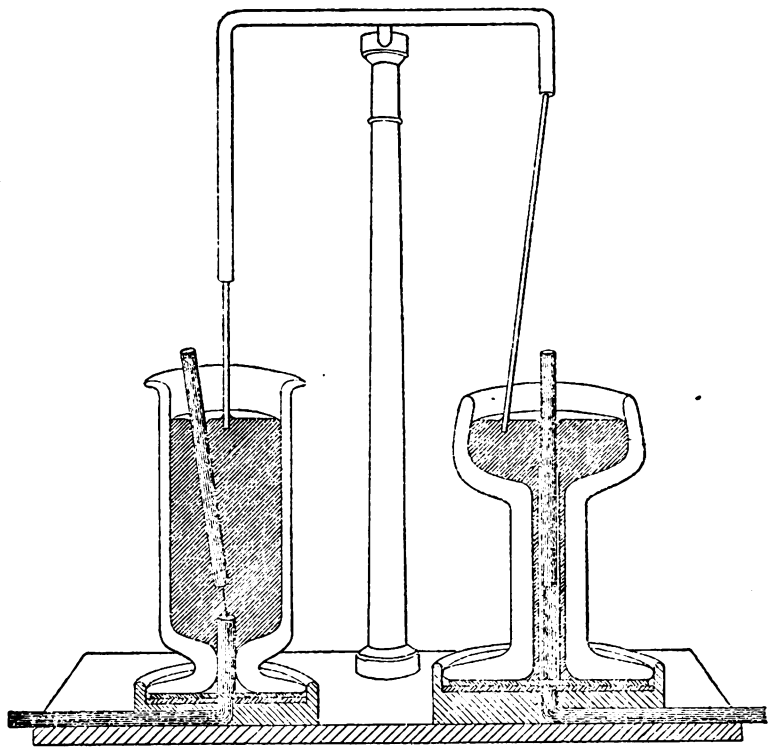


Fig. 1.

Rimanendo ancora nell'ordine qualitativo dei fenomeni accenneremo all'opera dell'Arago, che si trova esposta nel vol. XV degli *Annales de chimie et de physique* (pag. 93 e seg.). Egli ha messo in evidenza il fenomeno della magnetizzazione del ferro dolce in presenza del campo magnetico della corrente. Ha cominciato con l'immergere un filo percorso da corrente in limatura di ferro, e ne lo ha estratto vestito da una serie di guaine di limatura per modo che, egli dice, un filo assai sottile acquistava diametro presso a poco uguale a quello di un'ordinaria penna. Per quest'esperienza e per altre simili deve attribuirsi all'Arago l'osservazione dei primi

Digitized by Google

spettri magnetici. In unione ad Ampère, e per suggerimento di questo, egli inoltre ha magnetizzato aghi d'acciaio collocandoli entro un'elica elettromagnetica, e per mostrare l'azione a distanza dell'effetto magnetico della corrente e togliere ogni dubbio al riguardo avvolgeva gli aghi in carta.

Si deve ancora ricordare che fu l'Arago in questa stessa memoria a proporre a Sir Humphray Davy a Londra di sperimentare l'azione fra un magnete e l'arco voltaico. Egli pensò al Davy perchè questi possedeva a Londra una pila di 2.000 elementi, dalla quale aveva già otttenuto fra punte di carbone archi luminosi della lunghezza fino a quattro pollici opportunamente rarefacendo l'ambiente. Il Davy tentò l'esperimento: quell'arco fu la prima corrente di convezione della quale si fosse cercato di osservare il campo magnetico.

Il Davy fu tra i primi che studiarono i fenomeni elettromagnetici, e molti ne riscoprì, compreso quello dell'azione fra correnti elettriche. Egli ne dette notizia in una memoria pubblicata nel *Philosophical Magazine* (vol. 58) con la data del 12 nov. 1820, nella quale è aggiunta la dichiarazione che il volume contenente i risultati dei fisici Francesi era giunto a Londra il 24 dello stesso mese, e perciò il Davy non aveva potuto aver notizia delle scoperte dei Colleghi d'oltre Manica.

Chiuderemo questa storia succinta delle origini dell'elettromagnetismo e dei primi studi di ordine qualitativo riproducendo la figura di due piccoli apparecchi, con cui nell'anno 1821 sperimentò un giovane fisico trentenne a Londra. A sinistra della figura si vede un bicchiere, quasi pieno di mercurio, in cui galleggia un magnete rettilineo poco inclinato rispetto alla verticale: una corrente elettrica può essere inviata dall'asticina, che scende dal supporto superiore, fino ad immergersi nel mercurio, penetrare nella massa di questo, ed uscirne da un pezzo conduttore infilato attraverso il fondo del bicchiere. Il magnete è attaccato con un filo di cotone all'estremità superiore di questo pezzo conduttore. A destra della medesima figura si osserva un recipiente di altra forma, parimenti con mercurio, lungo il cui asse è fissato un magnete rettilineo, che sporge dalla superficie libera del mercurio alcuni millimetri. La corrente elettrica può entrare per un filo conduttore, che si stacca dal supporto superiore, e nella figura è inclinato leggermente rispetto alla verticale, attraversare la massa del mercurio, ed uscire per il fondo come nell'apparecchio di sinistra. In questo, quando lo percorre la corrente, ruota il magnete per effetto della forza elettromagnetica, che la corrente esercita sul magnete: nell'altro ruota il filo per effetto della forza magnetoelettrica, che si esercita fra magnete e corrente. Ecco i primi motorini a corrente costante. Quel fisico trentenne era Michele Faraday.

Nè tardarono teorie e pratica per misurare le grandezze in giuoco nel fenomeno di Oersted. In questo campo risplende di viva luce la figura di Andrea Maria Ampère. Egli osservò senz'indugio che per la misura dell'intensità della corrente poteva essere adoperata la stessa azione del circuito sopra un ago calamitato. Egli insegnò che come lo stato di tensione dell'elettricità nelle pile a circuito aperto era misurato dall'elettrometro, quello di movimento, a circuito chiuso, doveva esser misurato da uno strumento, che permettesse di valutare l'azione elettromagnetica. E propose per tale strumento il nome di *galvanometro*. Implicitamente, parlando di intensità della corrente, egli si riferiva a circuiti chiusi, lineari, con intensità costante, uguale in tutte le sezioni, per modo che il solo elemento per definire la corrente, a parte l'unità di misura, si riducesse ad un numero.

I primi ad eseguire misure furono Giovanni Battista Biot e Felice Savart, i quali misurarono l'influenza sulla durata delle oscillazioni di un ago calamitato di una corrente rettilinea indefinita parallela alla direzione dell'ago in riposo, ed enunciarono la legge, che va sotto il loro nome, secondo cui l'azione della corrente rettilinea indefinita sopra un punto magnetico positivo è inversamente proporzionale alla distanza del punto della retta lungo cui circola la corrente. L'azione è poi normale al piano costituito dalla retta e dal punto, ed ha il senso della sinistra di un osservatore, il quale, essendo disteso lungo la corrente come se nuotasse avendola a favore, guardi verso il punto magnetico. Quest'individuo, come è noto, si chiama appunto l'osservatore di Ampère, cui si deve la regola per il senso dell'azione elettromagnetica.

Per bene intendere in qual direzione potesse svilupparsi la teoria di queste azioni basta ricordare come in quell'epoca tutta la filosofia naturale fosse dominata dalla meccanica di Galileo e di Newton.

La legge di Coulomb per le masse elettriche e magnetiche, fondamento dell'elettrostatica e della magnetostatica classica, era un'estensione di quella di Newton a masse scalari, il cui valore potesse estendersi nel senso delle grandezze positive e negative. Ogni azione fisica, che si manifestasse con gli effetti di una forza, veniva interpretata, con la teoria delle azioni a distanza, come risultante, secondo la regola del parallelogramma, di azioni elementari infinitesime. Dominava inoltre il concetto del continuo, ed il postulato dell'uguaglianza fra azione e reazione, per cui la stessa entità fisica aveva la qualità di esercitare e di subire una certa azione, dal che derivava anche la tendenza ad attribuire la stessa intima natura ai sistemi agenti e pazienti. Secondo quest'indirizzo si ricercò l'espressione di un'azione elementare anche per i fenomeni elettromagnetici, e non tardò il concepimento dell'ipotesi di Ampère, secondo cui gli stessi fenomeni magnetici sono dovuti a circolazione di correnti elementari, e col potente strumento dell'analisi matematica le espressioni delle varie azioni magnetiche, elettromagnetiche, ed elettrodinamiche si poterono trasformare senza difficoltà le une nelle altre.

La decomposizione di un sistema magnetico in elementi era già stata introdotta nella scienza: appartiene a quella stessa epoca la magnetostatica di Poisson. La decomposizione in elementi di una corrente elettrica derivava spontaneamente dai concetti elettrocinetici di Ampère. Ad ogni elemento

Digitized by Google

di un conduttore lineare ds deve corrispondere un elemento di corrente, che sarà opportuno considerare come un vettore elementare, il cui modulo sia il prodotto dell'intensità i per ds, il quale sia diretto secondo l'elemento del conduttore, e nel verso della corrente.

Il Laplace, conosciuto il risultato delle misure di Biot e Savart, enunciò per l'azione elementare l'ipotesi che essa fosse diretta normalmente al piano del raggio vettore r e del punto magnetico P, cui essa doveva riferirsi, ed alla sinistra dell'osservatore di Ampère, e che inoltre essa dovesse essere inversamente proporzionale al quadrato della distanza r fra il punto P e l'elemento ds. Infine doveva nell'espressione comparire una funzione dell'angolo r, ds. Incontriamo così per la prima volta un esempio di azioni non centrali dirette perpendicolarmente al raggio vettore, che perciò taluni chiamano laplaciane.

Biot e Savart si posero alla ricerca della funzione dell'angolo r, ds ed a tal fine studiarono l'azione elettromagnetica di un circuito a forma di lettera V, cioè costituito di due semirette convergenti in un punto sotto un angolo θ. L'azione risultò, *caeteris paribus*, proporzionale alla tangente della quarta parte di θ. Una funzione che si può adottare per l'angolo r, ds in armonia con questo risultato è il seno: perciò l'azione laplaciana diventa:

$$d f = h\, m\, i\, \frac{\operatorname{sen}\,(r, ds)}{r^2}\, ds \qquad (1)$$

In questa formula m è l'intensità del punto magnetico, i quella della corrente, h un coefficiente, che dipende dalle unità di misura. Se si misurano le forze in dine, le correnti in unità elettromagnetiche $C\,G\,S$, le masse magnetiche in unità Gaussiane, il coefficiente h è l'unità, quando il mezzo ambiente è l'aria.

Volendo conservare il nome di massa per qualunque entità si manifesti con gli effetti di una forza, l'entità fisica contenuta nell'elemento $i\,ds$ si potrà chiamare massa vettoriale, o laplaciana. La teoria delle azioni a distanza si completa con questo concetto. Qualunque campo di forze (vettori) si può considerare come risultante dei campi elementari di determinate distribuzioni di masse scalari e vettoriali. Se accade che il campo sia indefinitamente esteso, che il vettore si annulli all'infinito, ed il mezzo, in cui le masse sono immerse, sia omogeneo ed isotropo, le masse scalari si debbono imaginare distribuite negli elementi di volume, dove è diversa da zero la divergenza del vettore, quelle vettoriali negli elementi dove non è nulla la rotazione. La massa scalare è proporzionale alla divergenza: quella vettoriale alla sua rotazione. Se il mezzo non è omogeneo, od il campo non indefinitamente esteso, si debbono considerare distribuzioni di masse tanto nelle superficie, che limitano il campo, quanto in quelle, attraverso cui cambiano le qualità del mezzo.

Come è noto, alcune teorie fisiche hanno attribuito esistenza fisica alle masse, alcune al vettore o ad entrambi questi elementi: ogni questione che ne deriva può avere importanza per la filosofia naturale, ma può anche rimanere insoluta per chi si accontenti di valutare caso per caso le azioni: la più corretta definizione del campo è che esso è l'insieme delle entità chiamate masse, e di quella che abbiamo chiamato vettore, essendo queste due entità coesistenti, e sottoposte rispettivamente alle leggi di Coulomb e di Laplace.

Poichè, come si è detto, con la teoria delle azioni a distanza si suole associare il postulato dell'uguaglianza fra azione e reazione, con la stessa formula (1) si valuterà l'azione elementare di un punto magnetico sopra un elemento di corrente. La stessa formula in questo caso può assumere un aspetto più significativo, se si osserva, che qualora si consideri nel punto dove ha origine l'elemento ds il vettore H, che ha per modulo $\frac{m}{r^2}$, ed è diretto secondo il raggio vettore r, e dalla parte opposta di quella dove è il punto magnetico, cioè se si definisce in unità Gaussiane il vettore del campo magnetico, che accompagna la massa m nel punto dove è l'elemento, l'azione del punto magnetico sull'elemento ds risulta:

$$d f = h\, i\, H \operatorname{sen}\,(r, ds)\, ds, \qquad (2)$$

normale al piano r, ds, cioè al piano del vettore magnetico e dell'elemento di corrente, diretta alla sinistra dell'osservatore di Ampère, quando questo guardi nella direzione di H. Scompare così dalla formula ogni traccia della massa magnetica, e si è autorizzati ad adottare la stessa espressione qualunque sia l'origine del campo magnetico, o in altri termini qualunque sia il sistema che lo costituisce. Con notazioni vettoriali, adottando il segno $\times$ per indicare un prodotto vettoriale, ed il punto sotto la lettera per indicare i vettori, si può scrivere:

$$d \underset{\cdot}{f} = h\, i \underset{\cdot}{ds} \times \underset{\cdot}{H} \qquad (3)$$

Adottiamo la convenzione secondo cui la terna del vettore prodotto del primo fattore e del secondo deve risultare orientata come le tre prime dita della mano destra.

Contemporaneamente Ampère, che aveva osservato le azioni elettrodinamiche (fra corrente e corrente) formulava l'espressione di un'azione elettrodinamica elementare (fra elementi di corrente). Egli si basava sopra tre esperienze, che si possono chiamare di riduzione allo zero, cioè esperienze relative a casi, in cui l'azione integrale è nulla, e che per questo meritano fiducia di grande approssimazione. Noi qui le enunciamo con frasi tratte dalla seconda memoria di Ampère, che ha per titolo: *Sur la détermination de la formule qui représente l'action mutuelle de deux portions infiniment petites de conducteurs voltaiques*. Le esperienze sono le seguenti:

1) Due porzioni uguali di uno stesso filo conduttore ricoperte di seta per impedire la comunicazione, attorcigliate insieme in modo da formare l'una attorno all'altra due eliche di cui tutte le parti sono uguali, e percorse da una stessa corrente elettrica, l'una in un senso e l'altra in senso contrario,

Digitized by Google

non esercitano alcuna azione, sia sopra un conduttore mobile, sia sopra un magnete.

2) Sono uguali sopra un conduttore mobile le azioni di due conduttori fissi, situati ad eguale distanza dal conduttore mobile, l'uno rettilineo, e l'altro piegato e contorto in una maniera qualsiasi, cioè qualunque sieno le sinuosità formate da quest'ultimo.

Con quest'esperienza Ampère ha legittimato la sostituzione al vettore elementare della corrente delle sue tre componenti secondo gli assi coordinati.

3) Una corrente circolare chiusa non può giammai produrre un moto continuo, sempre nello stesso senso, agendo sopra un conduttore mobile di una forma qualunque, che parta da un punto dell'asse innalzato perpendicolarmente sul piano del circuito dal centro del cerchio, di cui esso formi la circonferenza, e che termini ad un altro punto dello stesso asse, se il conduttore mobile non può muoversi che girando intorno a questo asse.

Più tardi Ampère ha dimostrato che è nulla anche l'azione di una frazione qualunque della corrente circolare ai fini del moto intorno all'asse, e quindi reciprocamente che l'azione del circuito spiccato dall'asse sopra un elemento della circonferenza non ha componente, la quale tenda a farlo ruotare intorno all'asse, cioè l'azione è normale all'elemento stesso. In altri termini, e più generalmente, un circuito chiuso di forma qualunque esercita sopra un elemento qualsiasi una forza ad esso normale.

Finalmente l'espressione di Ampère soddisfa alla condizione che l'azione fra due elementi non cambia se gli elementi stessi, e quelli che ne individuano la posizione relativa variano tutti nello stesso rapporto, rimanendo le correnti immutate.

L'espressione di Ampère è la seguente :

$$d_2 f = -\frac{k\, i\, i'\, ds\, ds'}{r^2}\left\{\cos\varepsilon - \frac{3}{2}\cos\theta\,\cos\theta'\right\} \quad (4)$$

in cui θ, θ' sono gli angoli che forma il raggio vettore r con gli elemeti ds, ds' : ε l'angolo, che essi formano fra loro. L'azione Amperiana è centrale, cioè diretta secondo la retta che congiunge i due elementi. La costante k è positiva, se si considerano positive le repulsioni.

Nel caso particolare di elementi paralleli, normali ambedue al raggio vettore, $\theta = \theta' = \frac{\pi}{2}$; $\varepsilon = 0$ e risulta :

$$d_2 f = -\frac{k\, i\, i'\, ds\, ds'}{r^2}. \quad (5)$$

Misurando le forze in grammi, e ponendo $k = 1$, si misurano le correnti in unità elettrodinamiche amperiane : misurando le forze in dine, e mantenendo $k = 1$, si misurano in unità elettrodinamiche (ordinarie). Come è noto, l'unità elettrodinamica vale $\frac{1}{\sqrt{2}}$ unità elettromagnetiche $C\,G\,S$.

Alla ricerca dell'espressione dell'azione elementare seguono le applicazioni a casi concreti di circuiti di dimensioni finite. Accenniamo alle principali tappe del cammino per giungere al principio dell'equivalenza fra correnti e magneti.

L'azione di un circuito s lineare, chiuso, di dimensioni finite, sopra un elemento generico ds' di un altro circuito si può esprimere mediante un vettore definibile per ogni punto esterno al circuito che si considera con soli elementi geometrici, le cui componenti secondo tre assi coordinati di una terna destra sono le seguenti :

$$\left.\begin{aligned} A &= \int \frac{y\,dz - z\,dy}{r^3} \\ B &= \int \frac{z\,dx - x\,dz}{r^3} \\ C &= \int \frac{x\,dy - y\,dx}{r^3} \end{aligned}\right\} \quad (6)$$

L'integrazione va estesa a tutto il circuito s.

In queste formule si suppone che il centro delle coordinate sia nel punto cui si riferisce il vettore: con x, y, z si indicano le coordinate dell'origine di un elemento generico del circuito, le cui componenti sono perciò dx, dy, dz, con r la distanza dell'elemento stesso dall'origine. A questo ente Ampère ha dato il nome di *direttrice*. Esso coincide col vettore potenziale dell'ordinaria teoria delle azioni a distanza per masse laplaciane distribuite uniformemente lungo il circuito con densità lineare unitaria ; cioè esprime l'azione che sopra una massa magnetica unitaria (unità di Gauss) eserciterebbe il circuito considerato, qualora lo percorresse l'unità elettromagnetica di corrente.

L'azione elementare elettrodinamica del circuito s sopra un elemento ds' di un altro circuito percorso dalla corrente i' ha per componenti :

$$\left.\begin{aligned} d f_x &= i\, i'\, ds\, ds'\,(C\cos m - B\cos n) \\ d f_y &= i\, i'\, ds\, ds'\,(A\cos n - C\cos l) \\ d f_z &= i\, i'\, ds\, ds'\,(B\cos l - A\cos m) \end{aligned}\right\} \quad (7)$$

se con l, m, n, si indicano gli angoli, che l'elemento ds' forma cogli assi coordinati.

Con le (7) si verifica immediatamente che l'azione $d f$ è normale all'elemento ds'.

Deve osservarsi che l'azione elementare amperiana fra due elementi ds, ds' non si otterrebbe mediante le (7) collocandovi invece dei valori finiti A, B, C i valori differenziali dA, dB, dC, con questi simboli designando gli elementi, che compaiono negli integrali (6). Così operando, si otterrebbero le seguenti espressioni per le componenti dell'azione elementare di ds su ds' :

$$\left.\begin{aligned} d_2 f_x &= 0 \\ d_2 f_y &= -\,i\, i'\, ds'\,\frac{x^2}{r^3}\, d\left(\frac{y}{x}\right) \\ d_2 f_z &= -\,i\, i'\, ds'\,\frac{x^2}{r^3}\, d\left(\frac{z}{x}\right) \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Digitized by Google

in cui il centro delle coordinate è supposto nell'origine dell'elemento ds, e l'elemento ds disteso lungo l'asse delle x.

L'azione espressa dalle (8) non è diretta secondo la congiungente i due elementi, come si proponeva Ampère, ma normalmente all'elemento ds', e giace nel piano (r, ds).

Il suo valore è:

$$d_2 f = \frac{i\, i'\, ds\, ds'}{r^2} \operatorname{sen}\,(r, ds) \cos \mu, \qquad (9)$$

in cui con μ si indica l'angolo dell'elemento ds' col piano r, ds.

Quest'espressione è stata proposta dal Reynard.

Evidentemente la più generale forma di azione elementare che, applicata a circuiti chiusi, condurrebbe al medesimo risultato di quella di Ampère, sarebbe fornita dalla terna seguente:

$$\left.\begin{aligned} d_2 f_x &= i\, i'\, ds'\, dX \\ d_2 f_y &= i\, i'\, ds' \left\{ dY - \frac{x^2}{r^3}\, d\,\frac{y}{x} \right\} \\ d_2 f_z &= i\, i'\, ds' \left\{ dZ - \frac{x^2}{r^3}\, d\,\frac{z}{x} \right\} \end{aligned}\right\} \qquad (10)$$

in cui X, Y, Z sono funzioni delle coordinate, e dX, dY, dZ i loro differenziali totali, il risultato della cui integrazione per un circuito chiuso è zero.

L'azione di Ampère si deduce dalle (10) ponendovi:

$$dX = d\,\frac{x\,x}{r^3}; \quad dY = d\,\frac{x\,y}{r^3}; \quad dZ = d\,\frac{x\,z}{r^3} \qquad (11)$$

Altre espressioni sono state proposte ponendo in luogo di x, y, z i prodotti fx, fy, fz, in cui f è una funzione della distanza r.

L'azione totale in tal guisa si può considerare come la risultante di quella di Reynard, che chiameremo $d_2 f'$ e di una seconda, che chiameremo $d_2 f''$.

Se si impone inoltre per $d_2 f''$ la condizione che essa sia perpendicolare alla retta r (forza di tipo laplaciano) deve farsi: $r f = A$, con A costante. Il valore di questa componente laplaciana dell'azione risulta:

$$d_2 f'' = \frac{i\, i'\, ds\, A}{r}\, ds \operatorname{sen} \theta \qquad (12)$$

e forma con l'elemento ds l'angolo $\theta + \frac{\pi}{2}$.

La componente di Reynard è inversamente proporzionale al quadrato della distanza: questa alla prima potenza.

Quando i due elementi sono disposti sulla stessa retta ambedue le componenti sono nulle.

Quest'ultima è l'ipotesi del Grassmann:

Indicandosi con dD il vettore di componenti:

$$d\,A = \frac{y\,d\,z - z\,dy}{r^3} \quad etc.$$

l'azione del Reynard assume la forma:

$$d_2 f = \frac{1}{2}\, i\, i'\, ds' \times d\,D \qquad (13)$$

L'azione su ds' di tutto il circuito s assume così la forma:

$$d_2 f = i'\, ds' \times H \qquad (14)$$

se si indica con H il vettore del campo magnetico della corrente i nel punto occupato dall'elemento ds', e si ritrova la (3).

Ma, come si vede, tutte queste formule hanno piuttosto l'aspetto ed il valore di esercitazioni matematiche, sulle quali non è necessario insistere.

E torniamo al primo maestro dell'elettrodinamica, ad Ampère, per accennare al suo solenoide elettromagnetico, cioè un sistema di correnti circolari uguali, distribuite uniformemente ed a brevi intervalli lungo un asse, su cui hanno i centri, ed a cui sono perpendicolari i loro piani. Si limiti la considerazione a solenoidi di molto piccola sezione, che indicheremo con f: si indichi con a la distanza fra due consecutivi, e si supponga il loro asse così lungo che un'estremità al limite si possa considerare a distanza infinita: vale a dire si studi il loro campo in punti molto lontani da un estremo, e non vicinissimi alla superficie, per modo che possa considerarsi infinitesimo il rapporto fra le dimensioni della superficie f e le distanze, che compariranno nelle formule, ed anche il rapporto fra queste distanze e la distanza del punto in cui si considera il campo da uno dei poli. La forma dell'asse può essere qualunque. Ampère, applicando la (7), ha dimostrato che l'azione di un circuito chiuso di forma qualunque sul solenoide è la medesima che esso eserciterebbe secondo la legge di Laplace sopra un polo magnetico concentrato nel polo del solenoide a distanza finita, e di intensità:

$$m = \frac{f\, i}{\sqrt{2}\, a} \qquad (15)$$

in unità Gaussiane.

Se invece si hanno due di tali solenoidi l'azione mutua coincide con quella di tipo Coulombiano, che eserciterebbero fra loro due masse concentrate nei loro poli a distanza finita, e di intensità:

$$m = \frac{f\, i}{\sqrt{2}\, a} \qquad m' = \frac{f'\, i'}{\sqrt{2}\, a'} \qquad (16)$$

in cui f', i', a' sono la superficie, l'intensità della corrente e l'intervallo nel secondo solenoide.

La via per enunciare il principio della corrispondenza fra magneti e circuiti era così aperta: magnetismo ed elettromagnetismo potevano diventare un solo capitolo della fisica teorica.

Sono notissime le successive tappe del cammino in questa direzione. Si definisce la lamina magnetica: il solenoide diventa una pila di lamine di sezione f, spessore a, potenza proporzionale all'intensità, il coefficiente di proporzionalità dipendendo dalle unità

Digitized by Google

di misura: esso sarà uno nel sistema elettromagnetico: ogni circuito chiuso potrà essere decomposto in circuiti elementari considerando una superficie, che abbia per contorno il circuito stesso, e dividendola in elementi con un doppio sistema di curve intersecantesi; la proprietà solenoidale del vettore elettromagnetico consentirà libera scelta per la forma della superficie: sarà spontanea l'ipotesi che lo stesso elemento magnetico di una sostanza materiale altro non sia se non il sostegno di una corrente circolante in un brevissimo circuito chiuso immerso nella sostanza.

Il principio è chiamato in generale della equivalenza, benchè non si debba mai perder di vista che il campo magnetico e quello elettromagnetico coincidono solamente nello spazio esterno ai loro sostegni. Così quello di una lamina coincide con quello di una corrente, che ne percorra il contorno, in tutti i punti esterni alla lamina. La differenza, che non ha bisogno di commento dal punto di vista fisico, appare manifesta anche sotto l'aspetto matematico se si considera la funzione potenziale. Quella della lamina è monodroma: quella della corrente ha in ogni punto infiniti valori, che costituiscono una progressione aritmetica. La differenza di due termini successivi è proporzionale all'intensità: essa si verifica quando il punto potenziato percorre una traiettoria chiusa qualunque concatenata col circuito. Nel sistema elettromagnetico di unità il coefficiente di proporzionalità è 4π. Ne discende la giustificazione della misura di un'intensità, che si compia senza alcuna comunicazione col circuito della corrente.

Un'altra differenza notevole si incontra quando si ricerca il valore dell'energia potenziale mutua di due circuiti o di due lamine. Prendendo in entrambi i casi come posizione di origine quella per cui lamine o correnti sieno lontanissime l'una dall'altra, l'energia mutua di due lamine di potenza p, p' è $w = -p\,\Theta'$, indicando con Θ' il flusso magnetico proveniente dalla lamina p' ed attraversante la lamina p penetrando per la faccia negativa: quella delle due correnti equivalenti alle lamine ha lo stesso valore numerico col segno positivo. La differenza dipende appunto dall'energia del volume interno alla lamina, in cui il campo magnetico differisce essenzialmente da quello elettromagnetico. Nè va dimenticata l'origine delle trattazioni analitiche, cui abbiamo accennato. Il circuito è stato considerato come sostegno di entità fisiche con carattere invariantivo: una volta creato, e conferitagli la propria energia potenziale, si suppone che nulla vari più in esso, come appunto si ammette accada per masse materiali, o per masse di tipo coulombiano. L'elettromagnetismo e l'elettrodinamica di Biot Savart ed Ampère sono lo studio di campi, in cui entità determinate con carattere invariantivo agiscono a distanza finita con velocità infinita di propagazione: queste entità, alcune di tipo scalare, altre di tipo vettoriale, sono interdipendenti, e l'interdipendenza è stabilita dalle formule di Coulomb e di Laplace. Il principio dell'equivalenza, che sarebbe più opportuno chiamare di corrispondenza, ai fini della ricerca dell'azione fra sistemi finiti mediante formule di azioni elementari, permette di considerare indifferentemente tanto determinate distribuzioni di masse coulombiane quanto corrispondenti distribuzioni di masse laplaciane. Del resto codeste deduzioni puramente formali sono applicazioni varie delle più generali trasformazioni analitiche fra integrali di volume ed integrali di superficie o di linee. In queste teorie, come non si pone il quesito onde i circuiti traggano la loro energia potenziale, ed attraverso quale meccanismo la conservino, così non ha significato la domanda onde traggano la loro energia potenziale le correnti elementari amperiane in seno agli elementi magnetici, e perchè di esse non si abbia altra manifestazione esterna che quella del campo.

Il primo, che introdusse nello studio dell'elettrodinamica il concetto elettrocinetico fu Guglielmo Weber (1846), il medesimo, che sviluppò il sistema delle unità elettromagnetiche. Se il fenomeno della corrente elettrica consiste in un movimento di cariche elettriche, la legge da cui nei casi concreti debbono potersi ricavare le azioni elettromagnetiche ed elettrodinamiche deve contenere oltre agli elementi geometrici cariche e velocità: in funzione di queste dovrà esprimersi l'intensità della corrente: quando poi si desideri esprimere le azioni in funzione delle correnti basterà nelle loro espressioni analitiche eliminare le velocità servendosi della relazione ammessa fra queste e le intensità della corrente.

Passiamo ora ad esporre la teoria dell'elettromagnetismo secondo questa traccia. Per brevità e simmetria non seguiremo l'ordine storico.

Quanto alla relazione fra le intensità e le cariche ricordiamo le due ipotesi: quella, che si chiama dualistica, secondo cui la corrente è il moto simultaneo di cariche uguali e contrarie procedenti in senso opposto con uguali velocità: l'altra, secondo cui la corrente può essere considerata o come movimento in un senso di una carica od in senso opposto della carica di nome contrario, oppure flusso simultaneo di cariche in senso opposto, pur con velocità diverse e di grandezza diversa. Ambedue queste ipotesi sono sottoposte al postulato secondo cui per gli effetti magnetici il moto di una carica positiva in un senso con una data velocità non è distinguibile dal moto in senso contrario di una carica di nome contrario con la medesima velocità: nè è distinguibile il moto quando carica e velocità variano in modo che ne rimanga costante il prodotto.

Se si chiama con e la carica contenuta nell'unità di lunghezza del conduttore e con v la sua velocità, e si suppone la carica distribuita uniformemente come accadrebbe di un fluido omogeneo, che dovesse riempire il conduttore per un tratto unitario, la quantità di elettricità, che un osservatore vedrebbe passare attraverso una sezione di quel tratto di conduttore nell'unità di tempo si deve indicare con $e\,v$: a questo prodotto secondo ambedue le ipotesi si ammette debba considerarsi proporzionale l'intensità, ed il coefficiente di proporzionalità è l'unità in tutti i sistemi di misura. Perciò secondo l'ipotesi dualistica si deve ammettere che due cariche $\pm e$ scorrendo in senso opposto con velocità $\pm v$ generino un'intensità $2\,e\,v$, e nell'altra ipotesi una carica e con velocità v, associata con una $-e'$ con velocità $-v'$, generi un'intensità: $e\,v + e'\,v'$.

Digitized by Google

Il Weber ha adottato l'ipotesi dualistica. Oltre alla sua teoria accenneremo a quella del Riemann, parimenti fondata sull'ipotesi dualistica, ed a quella del Clausius fondata sulla seconda ipotesi.

Per presentarle coordinatamente ricordiamo la loro deduzione dal principio di Hamilton. Nel nostro caso, per ciò che riguarda le cariche, come energia potenziale sarà considerata quella derivante dalle azioni di tipo coulombiano (elettrostatica), e come energia cinetica quella che si prevede posseggano le cariche per effetto delle loro velocità. Indichiamo la prima con U e la seconda con V. Se inoltre si vuol considerare un'energia cinetica di tipo meccanico ordinario, che possiamo indicare con T, le due equazioni, su cui deve fondarsi la ricerca delle forze, sono:

$$\left.\begin{array}{l} T + V + U = \text{cost.} \\ \delta \int (T + V - U)\, dt = 0, \end{array}\right\} \quad (17)$$

da cui si ottiene come espressione della forza elettrica da cui dipendono le energie U, V:

$$F_x = \frac{d}{dt}\frac{d}{d\dot{x}}(U - V) - \frac{d}{dx}(U - V) \Big\} \quad (18)$$

Il Weber ha adottate le espressioni seguenti:

$$U = \frac{e e'}{r} \qquad V = -\frac{e e'}{r} a^2 \left(\frac{dr}{dt}\right)^2 \quad (19)$$

essendo a una costante della natura dell'inversa di una velocità.

Applicando la (18) in cui si identifichi x con r, si ottiene:

$$F_r = \frac{e e'}{r^2}\left\{1 - a^2 \dot{r}^2 + 2 a^2 r \ddot{r}\right\}, \quad (20)$$

che è l'espressione dell'azione elementare Weberiana, di tipo centrale. Nel moto uniforme (correnti costanti) $\ddot{r} = 0$, ed a risulta l'inversa di quella velocità alla quale l'azione elettrostatica è compensata esattamente da quella di tipo dinamico.

Nel caso di due elementi di correnti costanti, che stanno sulla medesima retta, associando l'ipotesi dualistica e la (20), si ottiene come espressione dell'azione elettrodinamica elementare:

$$d_2 f = \frac{8 e e' v v'}{r^2} a^2 \, ds \, ds' \quad (21)$$

Rammentiamo che secondo Ampère si avrebbe:

$$d_2 f = \frac{k i i' \, ds \, ds'}{2 r^2} \quad (22)$$

Le due azioni coincidono se:

$$k = 4 a^2 \quad (23)$$

Il Weber ha usato unità elettrostatiche per le cariche: nella formula di Ampère risulta $k = 2$, se si misurano le intensità in unità elettromagnetiche: quindi $\frac{1}{\sqrt{2}\, a}$ deve risultare la velocità della luce. Il Weber ed il Kohlrausch associati hanno ottenuto dall'esperienza per $\frac{1}{\sqrt{2}\, a}$ il valore: $3,11 \times 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$. Indicando la velocità della luce con c, scriveremo definitivamente l'espressione della energia elettrocinetica Weberiana nel modo seguente:

$$V = -\frac{e e'}{2 c^2 r}\left(\frac{dr}{dt}\right)^2 \quad (24)$$

Il Riemann invece ha posto:

$$V = -\frac{e e'}{2 c^2 r} u^2, \quad (25)$$

in cui u è la velocità relativa delle cariche. Anch'egli accoglie l'ipotesi dualistica.

Il Clausius introduce le velocità assolute v, v' delle cariche, e pone:

$$V = \frac{e e'}{c^2 r} v v' \cos(v, v') \quad (26)$$

con l'ipotesi antidualistica, introducendo la quale nei calcoli si ottiene la seguente espressione di dV in funzione delle intensità i, i':

$$dV = \frac{i i'}{2} \cos(ds, ds') \, ds \, ds', \quad (27)$$

il medesimo elemento d'integrale cui era pervenuto Franz Neumann basandosi sull'espressione di Ampère, e considerando circuiti chiusi.

L'espressione, che si ottiene per l'azione elementare partendo dalla (26), si riduce facilmente a quella del Grassmann.

La possibilità di una ricerca sperimentale per decidere fra le tre espressioni dell'energia elettrocinetica surriferite è stata studiata dal Budde nel 1877, ma ormai aveva suonato da tempo la voce di Michele Faraday e lo spirito dei fisici era deviato verso la costruzione Maxwelliana: la teoria delle azioni a distanza doveva cedere il campo a quella delle azioni per zone contigue del mezzo. Prima però di accennare all'opera del Maxwell torniamo per brevi momenti alla parte sperimentale al fine di fare un cenno dei tipi di apparecchi cui dette origine l'elettromagnetismo.

Essi sono il galvanometro e l'elettromagnete nelle varie forme. Non appartiene all'argomento di quest'articolo il capitolo degli apparecchi di misura: accenneremo invece fugacemente agli elettromagneti.

L'idea di trasmettere segnali a distanza utilizzando i fenomeni della corrente elettrica delle pile si affacciò subito dopo la scoperta di Volta. Sembra che il primo a concepirla fosse il Soemmering, che la comunicò ad Arago.

Il Sig. Soemmering aveva pensato di preparare più voltametri, ciascuno individuabile con una let-

Digitized by Google

tera dell'alfabeto, e di collegarli con altrettanti fili ad una pila per modo che fosse possibile inviare la corrente attraverso a qualunque di essi a volontà. Osservando lo sviluppo di gas si poteva conoscere attraverso a qual voltametro la corrente era stata inviata, e quindi la lettera, che si era desiderato di trasmettere. Laplace aveva in quello stesso autunno del 1820, radioso per l'elettromagnetismo, pensato ad un telegrafo analogo adoperando con apparecchi rivelatori gli elettromagneti anzichè i voltametri. Se non che nessun esperimento eseguito su aghi calamitati con conduttori esterni alla pila lunghi più di alcuni metri dava risultati positivi. Non deve dimenticarsi che non si conosceva la legge di Ohm, nè alcun'altra equivalente intorno alla influenza sull' intensità della corrente elettrica della forma, delle dimensioni e della qualità del circuito esterno al generatore. E l' idea di utilizzare il nuovo agente a scopo di telegrafo doveva oltrepassare l' oceano, e doveva trascorrere dalla scoperta di Oersted più di un decennio perchè i primi tentativi in quest'ordine di applicazioni dessero qualche risultato positivo La prima parola feconda in argomento fu pronunciata da Giuseppe Henry. Egli dopo una serie di esperimenti condotti con vera genialità seppe distinguere due tipi di elettromagneti ; quelli p. e. destinati a sollevare pesi nel luogo stesso dove si trova la sorgente di forza elettromotrice, i quali possono essere costituiti da poche spire di filo di grande sezione ed eccitati anche da un solo elemento, e quelli ad es. a scopo telegrafico da essere adoperati sopra una lunga linea, che debbono essere avvolti con molte spire di filo, ed eccitati da un generatore con molti elementi. Egli chiamava i primi magneti di quantità, gli altri di intensità. Una delle frasi più interessanti, con cui egli enuncia la sua scoperta è la seguente :

« From these experiments it is evident that in forming the coil we may either use one very long wire, or several shortes ones, as the circumstances may require : in the first case, our galvanic combination must consist of a number of plates so as to give projectil force : in the second it must be formed of a single pair ». (A memorial of Ioseph Henry – Washington – pag. 225).

Elettromagneti efficaci per sollevare pesi precedettero in tempo quelli per scopo telegrafico. Il primo fu costruito da William Sturgeon di Woolwich in Inghilterra, il 1825. Esso era a ferro di cavallo, con materiale dolce, capace di sostenere alcune libbre. Aveva 18 spire di filo di rame con le estremità immerse in due piccole vaschette di mercurio, cui pervenivano i poli di una pila con 130 pollici quadrati di superficie attiva. Anche i maggiori progressi in elettromagneti per sollevare pesi si debbono ad Henry nel periodo dal 1828 al 1830. Egli ne costruì uno per il Yale College, con cui si poteva sollevare 3.000 libbre, ed uno per Princeton parimenti da 3.000 libbre, il quale però poteva essere eccitato da una batteria più piccola. In seguito, avviati gli studi sistematici sulle proprietà magnetiche del ferro, sui circuiti elettrici e magnetici, iniziate le applicazioni industriali della corrente elettrica, la costruzione degli elettromagneti progredì del pari, e se ne ebbero di molti tipi secondo i fini da raggiungere e le condizioni del circuito, con cui dovevano essere eccitati : ma non di quest'argomento deve occuparsi il presente articolo.

Chiuderemo la parentesi sugli elettromagneti ricordando che il campo magnetico più intenso ottenibile stabilmente raggiunge appena i 50.000 gauss in un interferro della sezione di un centimetro quadrato e della lunghezza di un millimetro : per frazioni di secondo, eccitando con scariche ottenute da condensatori rocchetti opportunamente preparati, si è giunti in brevissimi spazi ad alcune centinaia di chilo-gauss (5 per 0.003 secondi).

E soffermiamoci su Clerk Maxwell, il Newton delle azioni attraverso i mezzi continui. L'idea di una propagazione delle azioni elettriche con velocità finita a somiglianza della luce e del suono aveva gettato qualche bagliore prima che Maxwell la ponesse in piena luce. Fino dal 1845 il Gauss scrivendo al suo scolaro Weber aveva confessato che l'argomento delle azioni elettrodinamiche lo affaticava molto, ma egli non si decideva a scriverne per il pubblico perchè « ihm das gefehlt, was er als den eigentlichen Schlussstein betrachtet hatte, nämlich die Ableitung der Zusatzkräfte (die zu der gegenseitigen Wirkung ruhender Elektrizitätsteile noch hinzukommen, wenn sie in gegenseitiger Bewegung sind) aus der nicht instantanen, sondern (auf änliche Weise wie beim Licht) in der Zeit sich fort pflanzenden Wirkung ».

Riemann, scolaro di Weber, nel 1858 considerò il potenziale di una massa elettrica in moto come soluzione dell'equazione differenziale :

$$\frac{1}{v^2}\,\frac{\delta^2 V}{\delta t^2} = \Delta V + 4\pi\rho \qquad (28)$$

caratteristica delle propagazioni con velocità v, ed adottò come espressione del potenziale nel luogo occupato dalla massa e la funzione $V = \frac{ee'}{r(tt')}$, in cui con $r(t, t')$ si indica la distanza del punto occupato nell'istante t dalla massa e da quello occupato nell'istante precedente $t' = t - \frac{r}{v}$ dalla massa e'. Il Riemann partendo dalla (28) ed eseguendo la sommatoria per tutte le cariche che sono in giuoco in conduttori percorsi da correnti costanti, ed assumendo per valore di v quello della velocità della luce, pervenne anche ad un'espressione del potenziale coincidente con quella nota del Neumann. Ma queste anticipazioni non diminuiscono la gloria di Maxwell, il quale, imbevuto delle idee di Faraday, costruì una teoria completa, la quale abbracciando tutto l'elettromagnetismo e l'elettrodinamica vi comprende l'ottica, ed alla scienza e a sè stesso innalzò, come ebbe a dire il collega e coetaneo Tait nell'articolo biografico a lui dedicato nell'enciclopedia Britannica, uno dei più splendidi monumenti, che abbia saputo creare il genio di un individuo.

Il pensiero di Maxwell, come abbiamo detto, è dominato dalle idee di Faraday, che fu il fisico dei mezzi continui prima che il Maxwell ne traducesse in equa-

Digitized by Google

zioni il loro comportamento. Egli era ancora studente a Cambridge quando scrisse la prima bozza della memoria *On the Faraday's lines of forces*, che il Tait ebbe occasione di esaminare, e dichiarò poco diversa dalla prova definitiva. La prima memoria del Maxwell sulla teoria elettromagnetica della luce è del 1867: la prima edizione del trattato *Electricity and magnetism* del 1873.

Il teorema, da cui trae origine l'elettromagnetismo del Maxwell, è quello della circuitazione magnetica, cui abbiamo accennato e che si può enunciare così: «Il lavoro delle forze del campo corrispondente al trasporto della massa magnetica unitaria lungo una traiettoria qualunque chiusa concatenata con un circuito è proporzionale all'intensità della corrente».

Il coefficiente di proporzionalità è 4π se il mezzo ambiente è il puro etere, e si adottano unità elettromagnetiche.

Il Maxwell si è proposto di dare la maggiore generalità a questo teorema, applicandolo a qualunque distribuzione di correnti. A questo punto occorre rammentare la definizione di densità della corrente (intensità riferita all'unità di superficie): attraverso questa definizione la corrente concatenata con una linea chiusa diventa il flusso della corrente attraverso una qualunque superficie, che ha la linea chiusa per contorno, ogni volta che la distribuzione del vettore corrente è solenoidale. Scriveremo l'equazione, che enuncia il predetto teorema nel modo seguente:

$$\int_C (\alpha\, dx + \beta\, dy + \gamma\, dz) = \\ = 4\pi \iint_S (l\, u_x + m\, u_y + n\, u_z)\, dS \qquad (29)$$

vale a dire: indicheremo con $\alpha\ \beta\ \gamma$ in un punto generico P le componenti cartesiane della forza elettromagnetica: con C una linea chiusa nel campo: con $u_x\ u_y\ u_z$ le componenti della densità di corrente: con S una superficie, che ha per linea di contorno la C, con $l\ m\ n$ i coseni di direzione della normale all'elemento ds, con opportuno riferimento al senso di circolazione della corrente rispetto a quella del contorno C.

Osserviamo inoltre che se si vuole estendere l'ipotesi della propagazione con velocità finita anche alle correnti bisogna abbandonare il concetto di circuiti necessariamente chiusi. Quando in un punto di un conduttore si manifesta una forza elettromotrice, l'elettricità nella sezione dove si è manifestata la forza, si metterà in moto: questo moto si propagherà anch'esso con una certa velocità non infinita, e man mano si manifesterà la corrente in regioni sempre più lontane. Con questa osservazione non si inquadra il concetto mantenuto finora, secondo cui una corrente in un circuito era definita completamente da un numero (intensità in ogni sezione) e dall'andamento del circuito stesso.

Col concetto del Maxwell invece si inquadra bene l'altra definizione, che considera l'intensità come prodotto di una carica per una velocità, ed anche questa deve essere opportunamente modificata per estendere il ragionamento alle correnti non lineari. A tal fine basta definire la densità di corrente come prodotto della distribuzione di volume ρ della carica per la sua velocità: riferendosi al cubo di lati uno a facce parallele o normali alla direzione delle correnti questa definizione risulta immediatamente giustificata.

Il Maxwell appunto ha cercato di far comparire nella seconda parte della (29) il vettore $\rho\, \dot{v}$ e di trasformarla in modo che vi compaia a moltiplicatore di dS un vettore solenoidale. Egli a tal fine ha associato alla legge fondamentale dell'elettromagnetismo il teorema di Gauss sulla divergenza del vettore elettrico. Il risultato è il seguente in notazione vettoriale:

$$\int_C \dot{H}\, ds = \\ = 4\pi \iint_S \dot{n} \left\{ \dot{i} + \frac{1}{4\pi c K} \frac{d\dot{E}}{dt} \right\} dS, \qquad (30)$$

in cui con $\dot{H}$ si indica il vettore elettromagnetico (di componenti $\alpha\ \beta\ \gamma$): con $\dot{E}$ il vettore intensità del campo elettrico: con $\dot{i}$ il vettore $\rho \frac{\dot{v}}{c}$ in cui ρ è la densità della carica, $\dot{v}$ la sua velocità: con K la costante elettrica del mezzo, con n un vettore unitario normale a dS. La velocità c della luce suol comparire perchè per seguire la tradizione di Maxwell-Hertz si suppone di valutare ρ ed E in unità elettrostatiche, H in unità elettromagnetiche. Il vettore

$$\dot{i} + \frac{1}{4\pi c K} \frac{d\dot{E}}{dt} \qquad (31)$$

è un vettore solenoidale in tutto il campo. Maxwell chiama questo vettore la densità della corrente totale: la (30) esprime che questa corrente è quella di cui si deve tener conto per calcolare il campo elettromagnetico.

La corrente totale si compone di due parti: la prima si può chiamare di convezione: essa ha luogo quando l'elettricità si muove sia sotto forma di cariche elettriche pure, sia sotto forma di materia elettrizzata: la seconda deve essere considerata ogni volta che cambia lo stato elettrico del mezzo. Questo vettore

$$\dot{c} = \frac{1}{4\pi c K} \frac{d\dot{E}}{dt} \qquad (32)$$

è stato chiamato dal Maxwell *corrente di spostamento*, perchè egli ha chiamato *spostamento* il vettore $\frac{\dot{E}}{4\pi c K}$ il quale può essere assunto come misura della modificazione che in seno ad un mezzo isotropo di costante elettrica K genera la sollecitazione elettrica $\dot{E}$. Infatti secondo uno dei modelli concepiti per rappresentare questa modificazione ogni elemento del mezzo può paragonarsi ad un dipolo. Ogni volta che varia il campo variano le cariche del dipolo come se una certa massa scorresse da un polo all'altro. In questo senso si giustifica il nome di spostamento e la relativa corrente.

La (30) applicata a circuiti di area infinitesima conduce alla seguente equazione:

Digitized by Google

$$\text{curl } \dot{H} = \frac{1}{Kc}\left\{\dot{E} + 4\pi K \rho \dot{v}\right\} \qquad (33)$$

nota come prima equazione di Maxwell.

Dobbiamo accennare, benchè non entri strettamente nel nostro argomento, alla seconda correlativa:

$$\text{curl } \dot{E} = -\frac{1}{c}\dot{H} \qquad (34)$$

Se si associano alle (33) (34) le relazioni relative alla divergenza:

$$\text{div } \dot{E} = 4\pi K\rho \qquad \text{div } \dot{H} = 0 \qquad (35)$$

risultano definite le divergenze e le rotazioni dei vettori elettrico e magnetico, e cioè risulta determinato il campo elettromagnetico (coppia per ogni punto del vettore elettrico e del vettore magnetico).

Le (33) e (34), che sono differenziali, contengono in sè l'ipotesi della propagazione delle azioni per zone contigue attraverso il mezzo.

La soluzione delle equazioni (33, 34, 35) per ogni arbitraria distribuzione di cariche e di loro movimenti presenta difficoltà analitiche insuperabili, ma il problema in qualche caso è semplificato se si introducono un potenziale scalare φ ed un potenziale vettore $\dot{A}$, da cui i vettori $\dot{E}$ ed $\dot{H}$ possano dedursi per mezzo delle relazioni seguenti:

$$\left.\begin{aligned} \dot{E} &= -\text{grad}\,\varphi - \frac{1}{c}\frac{d\dot{A}}{dt} \\ \dot{H} &= \text{rot}\,\dot{A}. \end{aligned}\right\} \qquad (36)$$

Si ottiene:

$$\left.\begin{aligned} \varphi &= \int \frac{d\omega}{r}\,(\rho)_{t-\frac{r}{c}} \\ \dot{A} &= \int \frac{d\omega}{r}\left(\frac{\rho \dot{v}}{c}\right)_{t-\frac{r}{c}} \end{aligned}\right\} \qquad (37)$$

Queste funzioni φ ed $\dot{A}$ costruite come le funzioni potenziali normali della teoria delle azioni a distanza con la sola differenza che le cariche debbano essere riferite al tempo $t - \frac{r}{c}$, sono i potenziali ritardati del Lorentz.

Con maggiore specificazione osserveremo che per iscegliere le cariche con cui debbono costruirsi le funzioni potenziali relative ad un punto P del campo si deve imaginare una sfera con centro P e di raggio indefinito, e che questa sfera si contragga indefinitamente con la velocità della luce, riducendosi al punto P nell'istante di tempo definito dalla lettera t. Le masse, che in questo istante fanno sentire la loro azione in P, sono tutte e sole quelle che la sfera incontra durante la sua contrazione. In questo senso preciso nelle equazioni di Maxwell è contenuta la legge di propagazione delle azioni elettromagnetiche, e questa risulta coincidente con quella della luce.

Quello cui si è accennato fin quì è l'elettromagnetismo dei corpi in riposo. Le equazioni per i corpi in movimento si possono parimenti dedurre dall'equazione (30) supponendo che la curva c sia trascinata nel moto senza deformazione. A risolvere il problema basta l'analisi matematica: il risultato è analogo al

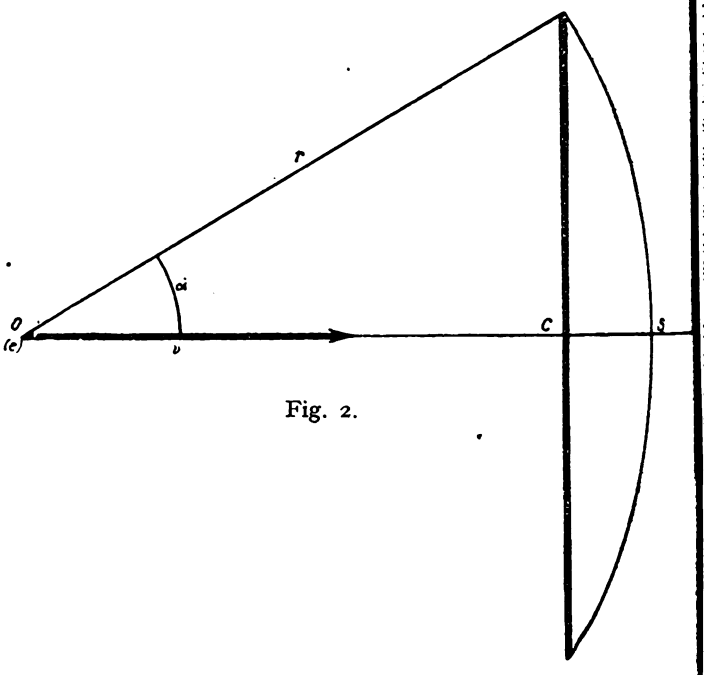


Fig. 2.

precedente: soltanto il vettore della corrente totale si arricchisce di un altro termine, la cui componente secondo l'asse delle x è:

$$a = \eta \frac{E_z}{4\pi K c} - \xi \frac{E_y}{4\pi K c} \qquad (38)$$

essendo $\xi\ \eta\ \zeta$ le componenti della velocità della materia.

Conviene ricordare un esempio di applicazione della (30) ad una sola carica e (fig. 2) che si muova con velocità uniforme v essendo O la posizione istantanea. Come curva C si deve assumere una circonferenza coassiale con la retta lungo cui si muove la carica: per evidenti ragioni, se il mezzo è uniforme, il campo elettromagnetico è simmetrico intorno a questo asse. Per superficie S si deve assumere una calotta sferica descritta con centro in O e raggio r. Se come valore del campo elettrico E si assume in ogni punto quello elettrostatico, che si deduce applicando la formula di Coulomb, e dimenticando la velocità finita di propagazione, si ottiene come intensità del campo magnetico in un punto generico di C

$$H = \frac{e v \operatorname{sen}\alpha}{c r^2} \qquad (39)$$

diretta secondo la normale al piano rv, cioè si torna alla legge di Laplace. Ma per ottenerla si deve appunto dimenticare la legge della propagazione con velocità finita, e si deve trascurare la de-

Digitized by Google

formazione, che nel campo elettrico induce la generazione di quello magnetico, dal che si può trarre la conclusione che son queste le condizioni sotto cui ha valore la legge di Laplace. Esse si realizzano con tanto maggiore approssimazione quanto più lentamente col tempo variano le grandezze in gioco, e quanto più ristretto in spazio è il campo, in modo che il tempo necessario perchè ogni perturbazione lo percorra nel senso delle maggiori distanze sia trascurabile rispetto a quello durante il quale le varie grandezze presentano apprezzabili variazioni. Perciò le formule dell'elettromagnetismo classico cessano di aver qualunque valore, anche di larga approssimazione, per correnti di conduzione su lunghissime linee o per correnti di altissima frequenza.

Così abbiamo brevemente riassunto i procedimenti analitici della nuova teoria dell'elettromagnetismo. Ma le leggi del campo magnetico per tutti i tipi di corrente definiti dal Maxwell, oltre quelli già sperimentati di pura conduzione o di convezione elettrolitica, dovevano essere verificate sperimentalmente. La più gran somma di lavoro in questo campo si incontra per le correnti di convezione, che si ottengono facendo ruotare od altrimenti muovere con opportuna velocità, la quale deve esser piuttosto grande perchè si abbia un effetto apprezzabile, cariche elettriche distribuite su conduttori metallici isolati, o sopra dischi di materiale isolante. Chi desideri conoscere queste esperienze, insieme con una loro critica magistrale, può leggere due memorie del nostro Righi pubblicate nel *Nuovo Cimento* (anni 1901-1902).

Chi si è occupato di questo argomento con maggior lena è il Rowland, che fu anche il primo ad ottenere risultati positivi, cioè deviazioni di un sistema magnetico in vicinanza di un disco di ebanite dorata, diviso in settori, girante velocemente intorno al proprio asse. Le prime esperienze del Rowland risalgono al 1876 e furono eseguite a Berlino sotto Helmholtz. Egli poi le continuò nella Johns Hopkins University a Baltimora e ad intervalli le riprese fino alla sua morte (1901) perchè risultati decisamente negativi erano intanto ottenuti e pubblicati dal Cremieu, il quale aveva concluso le sue ricerche con la frase esplicita: *la convezione elettrica non produce campo magnetico*. Altri sperimentatori, che si sono occupati di questo argomento, sono il Lecher, il Röntgen, C. T. Hutchinson, il Pender. Il Righi aveva espresso l'opinione che il risultato negativo del Cremieu, il quale, se fosse stato confermato definitivamente avrebbe in realtà costituito un valido argomento contro la teoria di Maxwell, fosse dovuto ad una lastra conduttrice collocata fra il sistema magnetico ed il circuito della corrente di convezione. Egli cioè sospettò un'azione di schermo elettromagnetico, per cui non il campo di qualunque corrente si propagherebbe inalterato attraverso uno schermo conduttore.

La ricerca analitica, per suggerimento dello stesso Righi, fu fatta dal Levi Civita, il quale trattò due casi limiti, quello, in cui la corrente di convezione è dovuta ad una sola massa in moto, e quello in cui è dovuta ad una distribuzione lineare uniforme chiusa. Nel primo caso si ha un campo elettromagnetico aperto in ogni direzione irradiante dalla carica: nel secondo i campi delle singole cariche si intrecciano l'un l'altro.

Nel primo caso l'azione di schermo elettromagnetico tende ad essere completa al limite, quando la conducibilità della sostanza con cui esso è costituito tende a divenire infinita: per valori finiti della conducibilità dello schermo essa dipende dal valore di questa conducibilità e dallo spessore. Linee uniformemente caricate non subiscono azione di schermo.

Quest'ultimo risultato è d'accordo con quello noto fino dai tempi di Oersted, secondo cui l'azione elettromagnetica di una corrente costante non è trattenuta dall'interposizione di una lastra metallica fra la corrente e l'ago. La discussione del resto fu decisa in favore dell'esistenza del campo magnetico da esperienze eseguite dal Pender.

Un altro tipo di corrente di convezione è stato studiato dal Wood nel 1902: esso è molto semplicemente costituito dal getto di particelle di anidride carbonica solida, che vien fuori da uno degli ordinari recipienti metallici, in cui questo gas è compresso. Con opportune forme del tubo di uscita si ottiene che il pulviscolo solido per attrito delle pareti, contro cui sfrega a grandissima velocità, si elettrizzi fortemente: il getto costituisce pertanto una corrente di convezione. Il Wood, dirigendola entro un tubo di vetro, è riuscito a veder deviare dalla sua posizione di equilibrio naturale un sistema magnetico sufficientemente delicato posto al di sotto del tubo, e perciò in condizioni da rilevare il campo elettromagnetico della corrente.

Intanto si iniziavano e si sviluppavano rapidamente gli studi sulla più pura forma di corrente di convezione, che è quella dei raggi catodici, e la storia dovrà registrare un'altra grande massa di risultati sperimentali onde trarranno origine nuovi concetti e nuove teorie. Ma completiamo prima il cenno sulla teoria elettromagnetica di Maxwell ricordando le sue definizione di energia elettrica e magnetica. Il maestro per quanto riguarda l'energia (è noto che quel sommo non pervenne ad un unico modello per l'interpretazione dei fenomeni elettrici e magnetici, ma ne adottò diversi per i vari campi) la concepì come entità scalare distribuita nei mezzi elettrici e magnetici, e quindi anche nel puro etere, da lui considerato come un mezzo perfetto diverso dagli altri soltanto per il valore delle costanti caratteristiche: ogni elemento del mezzo secondo questa accezione conterrebbe una quantità infinitesima di energia: la distribuzione sarebbe inoltre continua. Indicando con E ed H i tensori del campo elettrico e del campo magnetico, la densità di distribuzione delle energie corrispondenti sarebbe data dalle espressioni seguenti:

$$W_e = \frac{E^2}{8\pi k_e} \qquad W_m = \frac{H^2}{8\pi k_m} \qquad (38)$$

essendo k_e, k_m le costanti del mezzo.

Digitized by Google

Inoltre nei fenomeni elettrici entra in giuoco l'energia dissipata per effetto Joule.

Se l'energia per la sua continuità è paragonabile ad un fluido che riempia un dato volume, il quale può estendersi fino a distanza infinita (perchè l'etere per definizione è dovunque) vi sarà luogo a considerarne il flusso: la trasmigrazione (irradiazione) di energia da un luogo ad un altro potrà essere trattata come flusso attraverso una superficie, che separi il luogo da cui l'energia procede dal luogo verso cui essa procede. Lo studio matematico su questa traccia concettuale è stato fatto dal Poyntig, il quale definì il vettore energia con il tensore:

$$P = \frac{1}{4\pi} E H \operatorname{sen} \vartheta \quad (39)$$

essendo ϑ l'angolo dei due vettori E ed H, ed essendo il vettore P diretto normalmente al piano $E H$ in guisa da costituire con i due vettori E ed H una terna destra, e dimostrò che tutto accade come se attraverso ogni elemento di superficie dS disposto nel campo elettromagnetico normalmente al vettore P trasmigrasse l'energia $P d S$. Quella di Poyntig è una pura ipotesi: egli vi è pervenuto calcolando il totale flusso attraverso una superficie qualunque di dimensioni finite: questo risultato era espresso da un integrale: egli ha considerato la funzione, che compariva sotto il segno di integrazione, per definire il suo vettore. Evidentemente l'aggiunta al vettore di Poyntig di qualunque vettore distribuito solenoidalmente nel campo conduce ad un'ipotesi diversa, altrettanto accettabile come ipotesi di lavoro per fare i calcoli relativi a sistemi di dimensioni finite.

Il teorema di Poyntig divenne caro ai fisici ed agli elettrotecnici: il nostro Ferraris soleva illustrarlo ampliamente nei suoi corsi di lezioni, quando concepiva i trasporti di forza a distanza come movimento di energia in seno al dielettrico in cui sono immersi i conduttori della corrente, e considerava le stesse linee come asse del fenomeno, come le rotaie per un treno.

Siamo così venuti all'ultimo capitolo della teoria dell'elettromagnetismo, in cui emergono al primo piano le considerazioni energetiche.

I casi in cui lo studio può essere condotto senza gravi difficoltà analitiche non sono molti: naturalmente si è cominciato dai moti rettilinei delle cariche elettriche e magnetiche. Chi desidera esaminare la trattazione analitica può leggere la memoria del nostro Righi presentata alla R. Accademia di Bologna il 24 febbraio 1901. *Sui campi elettromagnetici e particolarmente su quelli creati da cariche elettriche o da poli magnetici in movimento.* Vi troverà la trattazione del dipolo di Hertz, il caso della vibrazione circolare di un doppio punto elettrico: quello della carica elettrica in moto rettilineo ed uniforme: quello di una particella carica in moto vario qualunque, ma con piccola velocità, ed alcuni casi relativi a sistemi di cariche in moto, come una retta elettrizzata uniformemente in moto uniforme e rettilineo, un piano uniformemente elettrizzato in moto uniforme, una lamina magnetica mobile nel proprio piano. Il caso della retta uniformemente elettrizzata in moto rettilineo ed uniforme conduce alla stessa espressione di Biot e Savart per la forza magnetica: quello del moto qualunque di una massa elettrica con piccola velocità alla legge elementare di Laplace. E si ottiene così una nuova documentazione delle limitazioni entro cui valgono queste leggi.

Il moto di una carica in orbita chiusa è stato trattato dal Larmor: esso conduce alla seguente formula per la totale radiazione dell'energia

$$W = \frac{2}{3} \frac{e^2}{c^3} r^2 \omega^4$$

se si indica con r il raggio dell'orbita e con ω la velocità angolare. Con W si indica l'energia totale che la particella irradia ogni unità di tempo. In questo caso E ed H variano periodicamente col tempo: il loro periodo coincide con quello del movimento della carica: l'energia irradia sotto forma di onde della stessa frequenza.

Attraverso questi risultati si schiudeva all'elettromagnetismo la via per congiungersi col capitolo dell'energia raggiante.

Contemporaneamente si sviluppavano, come si è detto, gli studi sperimentali per la verificazione dei risultati della teoria approfittandosi specialmente delle manifestazioni elettriche in recipienti vuoti. Essi condussero alla scoperta dell'elettrone, alla misura della massa elettromagnetica ed alle più intime investigazioni dell'energia raggiante. Con l'elettrone fu dimostrata la natura atomica dell'elettricità: con il modello che se ne trae per le correnti elettriche tutti i fenomeni di queste sono interpretati facilmente, tranne in verità alcuni di quelli delle correnti di conduzione nei metalli, un campo ancora aperto all'investigazione sperimentale e teorica: gli studi sulla massa elettromagnetica condussero alla revisione dei principi della meccanica classica: quelli sull'energia raggiante alla teoria dei quanta. Questa, come è noto, è in contraddizione con quella di Maxwell. Se una carica, percorrendo orbite intorno ad un nucleo, irradia continuamente energia, le orbite debbono chiudersi a poco a poco, e la carica deve cadere in definitiva sul nucleo. Ciò non accade, nè alcuna esperienza esclude la possibilità di stati di equilibrio negli atomi materiali, i quali oggi si considerano come sistemi di nuclei ed elettroni, che ruotano come pianeti intorno al sole. Perciò qualche autore ha detto con frase molto espressiva che nel risultato relativo alla radiazione dell'energia, con cui l'elettromagnetismo ha esteso il suo campo nel dominio dell'energia raggiante, la teoria classica, pur così comprensiva e feconda, ha trovato un'insuperabile pietra d'inciampo. Da questa difficoltà di natura concettuale è derivata la teoria dei quanta.

Ed a questo punto crediamo di dover chiudere il nostro articolo sulla corrente elettrica e l'elettromagnetismo. Non ci dissimuliamo che alcuni argomenti sono stati taciuti, altri non furono probabilmente collocati nella giusta luce. Tra i taciuti è il

Digitized by Google

complesso delle teorie e degli studi istituiti per conoscere quali sono le entità, che subiscono direttamente la forza elettromagnetica quando questa ai nostri sensi si manifesta come forza meccanica su corpi materiali.

Quando ad es. un conduttore percorso da corrente contribuisce alla formazione della coppia negli ordinari motori, attraverso quale meccanismo la forza si trasmette dalle cariche al tessuto materiale? La coppia del motore non muta se i conduttori sono completamente immersi in un mezzo di elevata permeabilità, nel qual caso risulta indebolito, ed al limite annullato, il campo là dove esistono con la materia conduttrice le cariche elettriche. Gli studi e le teorie in questo campo costituiscono un'ingente massa di lavoro, che ha avuto origine con la scoperta di Hall; alla quale appartengono i capitoli sull'effetto Corbino, Righi, Leduc, Ettinghausen con escursione nella teoria di propagazione del calore, e che attende ancora il suo Newton o il suo Maxwell, perchè nessuno dei modelli escogitati finora inquadra logicamente tutto il materiale accumulato dagli sperimentatori.

Nè abbiamo fatto cenno a teorie, o formule, le quali si estendano sia pure con larga approssimazione alla propagazione dei fenomeni elettrici e magnetici in mezzi non perfetti, per cui occorre considerare più di una costante, nè ai fenomeni di isteresi, la cui interpretazione è finora assai mal certa.

Egli è che ogni estensione nel campo del puro elettromagnetismo conduce ad interferenze con molti altri. I progressi della scienza consistono in gran parte in demolizione di barriere.

Noi ci proponevamo soltanto un'illustrazione succinta dei rapporti fra corrente elettrica ed elettromagnetismo durante il secolo trascorso dall'origine della sua dottrina. Abbiamo visto come rapidamente per l'opera di Biot e Savart, Ampère, Laplace essa ha servito al completamento della teoria delle azioni a distanza: poi come di questa stessa abbia scalzato le basi per dar origine con l'opera di Faraday, Maxwell, Hertz alla teoria delle azioni, che si propagano per zone contigue in mezzi continui con velocità finita. Attraverso questa teoria una porzione dell'ottica è divenuta un capitolo dell'elettromagnetismo. Seguì lo studio del movimento delle cariche isolate, e dei sistemi di cariche, e dall'elettromagnetismo orientato in questa direzione derivò la scoperta della costituzione granulare dell'elettricità, la quale a sua volta obbligò i fisici a costituire anche per l'energia un modello analogo. Gli stessi fondamenti della meccanica classica parvero scossi.

Il principio dell'equivalenza di Ampère, che unificò per la prima volta i fenomeni elettrocinetici e magnetici, condusse allo studio dei corpi magnetici considerati come sistemi di orbite di cariche elettriche, e la teoria relativa si intreccia con quelle della termodinamica e della meccanica statistica.

Giunto a questo elevato grado di sviluppo l'elettromagnetismo deve essere considerato come un capitolo della fisica strettamente connesso con tutti gli altri; cioè una porzione non più separabile di tutto il pensiero fisico, specialmente se deve ammettersi l'ipotesi che tutto l'universo fisico possa ridursi ad aggregati di sistemi di atomi elettrici in movimento, perchè l'elettromagnetismo è la teoria e lo studio delle manifestazioni fisiche di questi atomi in moto.

Come questo pensiero scientifico si vada sviluppando, per quali vie sia diretto attualmente, verso quali mete, sarebbe certamente opera di sommo interesse, ma la difficoltà è pari alla mole, e si varcherebbero di troppo con i limiti di quest'articolo quelli della competenza dell'autore.

Digitized by Google

Digitized by Google

ING. PROF. LUIGI LOMBARDI

R. SCUOLA D'INGEGNERIA DI ROMA

L'INDUZIONE ELETTROMAGNETICA

Digitized by Google

Digitized by Google

Fra le opere mirabili di A. Volta, di cui l' Italia a ragione ha voluto che si completasse la edizione per il centenario glorioso della sua morte, sciogliendo troppo tardi un debito sacro di gratitudine nazionale, non si trova alcun cenno dei fenomeni di induzione elettromagnetica, se per avventura non si voglia tra questi comprendere l'eccitazione del momento magnetico in una sbarra di ferro, tenuta nella direzione del meridiano magnetico, e colpita da una forte scarica elettrica; per effetto di questa il grande Fisico ritenne però che venissero le sue parti semplicemente poste « in un gagliardo moto intestino » (Cart. D. 60), atto a favorirne la calamitazione.

Questo documento, al pari di vari altri del prezioso Cartellario che, per incarico della benemerita Commissione Voltiana, il Prof. Massardi ha sapientemente riordinato, si ispira, nel tentativo di spiegare i numerosi fenomeni osservati, al concetto a quell'epoca prevalente, di una stretta analogia fra il fluido elettrico e quello magnetico; di essa A. Volta fa la precisa enunciazione nel programma schematico delle sue lezioni sul magnetismo (Cart. O. 55), ove istituisce il confronto fra il magnetismo e la elettricità così detta *di pressione* (statica), « considerando tutti « i corpi, eccetto il ferro e le calamite, come coibenti « assoluti del fluido magnetico, e supponendo il ferro « dolce più deferente che coibente di esso; il duro più « coibente che deferente; il temprato e l'acciaio coi« bente, non però assoluto, come sono tutti i corpi « non ferruginosi ». L' idea, che solamente il ferro possedesse e conferisse alle altre sostanze la proprietà magnetica, già enunciata un quarto di secolo prima dal fisico olandese Brugmann, venne accolta pienamente da A. Volta, il quale ne trasse conferma dalle esperienze del chimico inglese Chenevix, tendenti a dimostrare che il nikel stesso, convenientemente purgato da ogni traccia di ferro, perdesse qualsiasi suscettibilità di magnetizzarsi (Cart. E. 56).

Circa l'origine del campo magnetico terrestre, A. Volta aveva necessariamente delle idee assai confuse, a quanto traspare da una lettera del 1788 al Brugnatelli, ove Egli, commentando alcune osservazioni del De Saussure sopra la instabilità dell'ago magnetico in alta montagna, esprime l'avviso che « agente « magnetico non sia un supposto nucleo nella terra, « e neppure l'aggregato di tutti i corpi terrestri, ma « la terra e l'atmosfera insieme » (Collezione Antinori. T. III. p. 385).

La scoperta delle azioni elettromagnetiche è vanto di Oersted, e di essa il Comitato danese ha degnamente celebrato nel 1920 la ricorrenza centenaria, pubblicando a spese del suo Governo la memoria originaria in latino, che ha la data del 21 luglio 1820, e le traduzioni in lingua francese, italiana, tedesca e inglese, nelle quali essa venne in quel medesimo anno riprodotta dagli Annali di fisica, chimica e filosofia di Parigi, Lipsia e Londra e dal nostro Giornale di fisica, chimica e storia naturale di Pavia, con brevi commenti introduttivi dei Redattori. L'Autore attribuiva al circuito, di cui aveva studiato l'azione, l'appellativo *galvanico*, che si trova conservato nella traduzione tedesca e in quella inglese; i redattori delle lingue latine, francese e italiana, giustamente lo corressero in *voltaico* e *voltiano*, bene riconoscendo al nostro Grande il merito della scoperta della pila, che costituiva a quell'epoca l'unica sorgente di forza elettromotrice e di corrente conosciuta.

Che A. Volta, abituato a seguire nei tempi della sua indefessa attività gli studi relativi a tutte le manifestazioni elettriche, non abbia partecipato al movimento intenso di ricerche, il quale tenne dietro alla scoperta di Oersted, e nei suoi manoscritti non abbia lasciato traccia delle sue impressioni al riguardo, non è cagione di meraviglia a chi riflette che Egli a quella data aveva raggiunto l'età di 75 anni, e da un anno si era ritirato a vita privata. Si può dire che la produzione scientifica di A. Volta si arresti al 1817 con una Memoria sul Periodo dei temporali, nella quale Egli riprendeva uno studio anteriore del 1787.

Nel Cartellario Voltiano si trova ancora una lettera del 6 luglio 1823, non manoscritta, ma firmata da Lui, ove il Volta esprime un giudizio sfavorevole nei riguardi dei paragrandini, ed in un altra lettera del 26 luglio, pubblicata nella Gazzetta di Milano del 29 luglio dello stesso anno, si ritrova un richiamo alla precedente. Con questa si chiude definitivamente il periodo delle Sue manifestazioni intellettuali, atteso che il 28 luglio il nobile vegliardo era colto da un colpo apoplettico, che ne stremava le forze, e fatalmente preludeva alla Sua scomparsa (1).

La gloria di scoprire la induzione elettromagnetica, sperimentando su le correnti di origine Voltiana, era riservata a Michele Faraday, terzo nato nella mo-

(1) Debbo questi particolari alla cortesia del Prof. Massardi, a cui rendo anche in questo luogo grazie sincere.

Digitized by Google

destissima famiglia di un fabbro, che, non avendo i mezzi per procurargli alcuna istruzione, lo abbandonò fino a 13 anni fra i ragazzi di strada, collocandolo poi come garzone presso un calzolaio rilegatore. Egli apprese dai libri, che gli passavano per le mani, le prime nozioni di chimica e di elettricità, e si infiammò d'amore per la scienza, ascoltando poche lezioni di Tatum e di Davy. Assunto nel 1813 come inserviente nel Laboratorio della *Royal Institution*, egli vi ottenne nel 1821 la nomina di Ispettore, e nel 1822, riprendendo un concetto già lungamente meditato dall' Oersted, istituì le sue prime esperienze intese, come è annotato nel suo registro di quel tempo, a *cambiare il magnetismo in elettricità*.

Non avendo ottenuto con esse alcun risultato, Faraday ritentò la prova nel 1825, guidato dal presupposto che in un circuito elettrico, avvolto a spirale attorno a una sbarra calamitata, come questa subisce da parte della corrente un'azione, che ne modifica il grado di magnetizzazione, così essa dovesse reagire su la corrente, modificandone la intensità. Alla luce delle attuali conoscenze è ben chiaro che, nello stato di regime, nessuna alterazione poteva subire la corrente per la presenza della calamita, laddove all'atto della introduzione od estrazione di essa doveva nascere una forza elettromotrice, per la quale la intensità della corrente subiva una momentanea variazione più o meno rilevante, a seconda della resistenza del circuito e del momento della calamita. Le modalità della esperienza, ovvero la poca sensibilità del galvanometro incluso, non permisero tuttavia al Faraday di constatare per allora alcun effetto apprezzabile.

L'esperienza classica sul fenomeno di induzione elettromagnetica, che è fra le più geniali del grande scienziato, e può considerarsi come il fondamento di tutta la elettrotecnica moderna, venne da lui eseguita per la prima volta il 28 di agosto del 1831, avvolgendo sopra un medesimo anello di ferro dolce due distinte spirali, nel circuito di una delle quali era una pila e dell'altra un galvanometro. Chiudendo il primo, l'anello si magnetizzava, e nasceva nel secondo una corrente di brevissima durata; interrompendo il primo, nasceva nel secondo una corrente eguale di breve durata, ma di opposta direzione.

La prima comunicazione di questa esperienza venne fatta il 24 novembre 1831 alla *Royal Society*, e forma l'oggetto principale della prima delle *Experimental Researches in Electricity*, che in trenta serie successive vennero presentate da Faraday all'Accademia predetta fra il 1831 ed 1855, e furono poi da lui raccolte in due volumi, i quali videro la luce nel 1839 e nel 1855. Oltre all'esperienza mediante le due spirali, avvolte sopra il nucleo anulare di ferro, un'altra era stata da lui eseguita il 1° ottobre mediante spirali contigue, avvolte sopra un semplice nucleo di legno, aprendo e chiudendo il circuito di una di esse, contenente una pila, mentre l'altro era fisso e conteneva il galvanometro; un'altra ancora mediante due circuiti, invariabilmente chiusi, uno dei quali, comprendente la pila, mutava posizione davanti all'altro, contenente il galvanometro. Faraday stesso diede al fenomeno, che si manifestava fra i due circuiti in assenza del nucleo magnetico, il nome di *induzione voltaelettrica*, e in presenza di esso quello di *induzione magnetica*, e le modalità dell'una e dell'altra variò in molte guise, in modo da metterne in evidenza i caratteri più interessanti.

Nella ricerca della loro spiegazione Faraday si mostrò ancora, in quella prima nota, preoccupato di stabilire l'analogia fra l'induzione magnetoelettrica e quella elettrostatica, e suppose che la corrente induttrice, o la calamita che ne fa le veci, producessero nel circuito indotto, anche in condizioni di regime, uno stato speciale, da lui denominato *elettrotonico*. Le particelle del conduttore indotto avrebbero cioè dovuto trovarsi in uno stato di tensione, nel quale Faraday pensava che il corpo indotto opponesse una speciale resistenza al passaggio della corrente; la corrente indotta all'apertura avrebbe dovuto nascere solo quando quella condizione cessava. Le ulteriori esperienze, intese a ricercare gli indizi di quello stato speciale, non condussero però ad alcun risultato positivo, onde l'Autore abbandonò definitivamente la sua ipotesi primitiva.

Con raro acume il Faraday in quella stessa memoria applicò la sua scoperta alla spiegazione della memorabile esperienza *del magnetismo di rotazione*, eseguita da Arago nel 1824 provocando il movimento di un ago magnetico mediante la rotazione di un disco sottostante di rame, e ripetuta in senso inverso nell'anno successivo da Herschel e Babbage; scoperse il principio delle macchine omopolari, facendo rotare un disco di rame fra le estremità polari di una calamita permanente, e raccogliendone una corrente indotta mediante due spazzole appoggiate all'asse e su la periferia; stabilì il senso della corrente indotta in relazione agli elementi della calamita inducente, e introdusse per la prima volta il concetto e la definizione delle *linee di forza magnetica*, le quali ebbero poi tanta importanza nello studio di tutti i fenomeni analoghi, da lui esaminati, e gli permisero di trovarne la corretta interpretazione, astraendo da qualsiasi indagine di carattere analitico.

Tradotte più tardi in forma matematica dal genio di Maxwell, le idee di Faraday apparvero per la prima volta in tutto lo splendore della loro semplicità, ma non acquistarono perciò, per dichiarazione stessa di Maxwell, più grande rigore, onde questi a distanza di quasi mezzo secolo potè affermare che nessuna eccezione si era trovata all'enunciato della legge fondamentale dato dal Faraday, e che questo era il solo che non asserisse nulla di più di quanto può essere provato con l'esperienza, e come tale si doveva considerare come un'espressione matematicamente esatta del fenomeno, pur senza uscire dal linguaggio elementare.

Nella seconda serie di ricerche, letta alla *Royal Society* il 12 gennaio 1832, sono descritte molte esperienze relative all'induzione magnetoelettrica prodotta dal campo terrestre, ed è messa in chiaro l'influenza della conduttività elettrica su la intensità delle correnti indotte, e del verso del movimento su la direzione di esse. Nella terza è dimostrata la identità della elettricità voltaica con quella d'origine statica e con quella provocata per induzione, e del-

Digitized by Google

l'una e dell'altra viene paragonato l'effetto chimico e quello galvanometrico.

L'argomento della induzione magnetica è ripreso nella nona serie di ricerche, presentata alla Società Reale il 18 dicembre 1834, ove l'Autore esamina particolarmente i fenomeni, dovuti alla induzione propria dei circuiti, paragonandoli a quelli di induzione mutua fra due circuiti distinti, e introduce la denominazione di *extracorrente*, rievocando ancora una volta il concetto dello *stato elettrotonico*, e della trasformabilità delle forze elettrica e magnetica l'una nell'altra.

Nella serie undecima Faraday manifesta per la prima volta chiaramente il concetto, che l'induzione elettrostatica non sia un'azione delle particelle o delle masse, estesa a distanze sensibili, ma in ogni caso consista in una specie di polarizzazione delle particelle contigue, e prelude alla possibilità di rischiarare, e forse spiegare con un'unica legge, le relazioni fra l'induzione elettrica e la decomposizione chimica, fra il movimento dei joni e la conduttività elettrolitica, fra le manifestazioni elettriche e quelle magnetiche. Risalgono a quell'epoca (1837) le classiche esperienze su la conservazione delle masse elettriche, su la loro distribuzione alla superficie dei conduttori nello stato di equilibrio, e su l'influenza dei mezzi dielettrici nei fenomeni elettrostatici, estranee apparentemente all'argomento di questa nota, ma pur collegate con esso dalla stretta analogia, che il Faraday stesso intuiva, senza poterla matematicamente dimostrare, fra i diversi ordini di fenomeni, che la teoria elettronica ha modernamente ricollegati in un modo così semplice ed elegante.

E nella serie decimaterza, che in fondo non è che la continuazione delle tre precedenti, e si riferisce al medesimo ordine di fenomeni, preoccupandosi di scoprire un effetto, il quale rispetto alla elettricità statica potesse corrispondere a quello elettromagnetico della corrente, Faraday intuisce che i fenomeni d'induzione fra correnti possano costituire un anello di congiunzione, e che nei corpi isolanti si possano avere manifestazioni simili a quelle dei corpi conduttori, preludendo con mirabile chiaroveggenza alle ipotesi, su le quali parecchi anni dopo Maxwell doveva edificare la sua geniale teoria. Non è cagione di meraviglia che la imperfezione dei mezzi, di cui Faraday disponeva a quel tempo, gli abbia impedito di conseguire, con le numerose esperienze descritte nella serie quattordicesima (1838), i risultati brillanti cui Hertz pervenne mezzo secolo più tardi. Ma nella chiusa della serie diciannovesima delle sue ricerche (1845) egli esprime chiaramente il concetto che le azioni magnetiche, al pari di quelle elettrostatiche, dipendano da uno stato speciale del mezzo interposto, il quale non è soltanto di tensione, ma dipende interamente dalle linee di forza magnetiche che lo attraversano; e aggiunge che la conoscenza di questo modo di agire delle forze elettriche e magnetiche potrebbe essere utile nello studio della natura dei corpi trasparenti, della luce, delle calamite e delle loro azioni reciproche.

Nella serie ventesima, che fu presentata alla Società Reale nello stesso anno, Faraday descrive le sue esperienze sopra i corpi diamagnetici, e quelle eseguite sopra conduttori posti in movimento entro ai campi magnetici, per effetto dei quali vi sono indotte correnti che tendono ad arrestare il movimento.

In una conferenza, tenuta nell'aprile 1846, egli chiarì meglio l'idea che si era formata delle linee di forza, immaginandole presenti in tutto lo spazio, ed alle loro vibrazioni attribuendo anche i fenomeni di radiazione. La concezione di esse prendeva adunque nella mente di Faraday il posto di quella dell'etere, con la differenza che questo era generalmente inteso come un aggregato di particelle o centri di azione, là dove Faraday non concepiva esistere se non linee di azione. Di questa idea fondamentale, che servì di base a Maxwell per formulare la sua classica teoria elettromagnetica della luce, questi riconobbe esplicitamente a Faraday la priorità.

Nella serie ventesimasesta, presentata alla Società Reale nel 1850, Faraday studia i fenomeni di *conducibilità magnetica*, che oggi si chiamano più propriamente di *permeabilità*, e consistono nelle modificazioni delle condizioni di passaggio della forza magnetica attraverso ad una sostanza determinata. La presenza di questa ha per effetto di alterare, non solo nel suo interno, ma anche nello spazio circostante, la distribuzione delle linee di forza, e ciò in diverso senso, secondo che il corpo è para o diamagnetico, ed in misura diversa a seconda della sua conducibilità, che Faraday giustamente paragona alla capacità specifica dei dielettrici nel confronto coi fenomeni elettrostatici.

Nelle serie ventotto e ventinove, pubblicate negli ultimi mesi del 1851, l'argomento delle linee di forza è maggiormente approfondito, e il loro andamento viene studiato in base alle correnti indotte in un conduttore mobile nel campo; il numero delle linee, emananti da centri determinati, si dimostra costante, e nell'interno di una calamita si considera uguale a quello delle linee esterne, paragonando ognuna di esse ad un circuito chiuso, così che esse si identificano con quelle, che oggi si denominano *linee unitarie* ovvero *tubi unitari* di induzione.

Tutti questi concetti il grande Fisico inglese aveva enunciati nell'ordine stesso, in cui essi gli erano stati suggeriti dal progresso delle sue esperienze, e nella forma che meglio si adattava alla sua mentalità, astraendo da qualsiasi analisi matematica, sebbene la maggior parte dei Fisici di quel tempo, e sopra tutto i tedeschi, a questa facesse prevalentemente ricorso nella ricerca delle leggi dei fenomeni naturali.

Maxwell nella prefazione al suo classico trattato, che vide la luce della prima edizione nel 1873, spiega come, dopo avere a fondo studiato le Ricerche sperimentali di Faraday, gli sia riuscito agevole rivestirle di forma matematica senza nulla alterare della loro sostanza, o aggiungere al loro rigore, ond'egli, che per il primo aveva stabilito l'accordo fra i due metodi, e con suprema maestria adoperava lo strumento dell'analisi, a cui Faraday si era mantenuto del tutto estraneo, riconobbe di dover dare al metodo sintetico di lui la preferenza nello svolgimento della teoria del potenziale e di altre importantissime. E nel § 528 del suo trattato, che serve di introduzione al Capitolo

Digitized by Google

della induzione elettromagnetica, paragonando con questo il procedimento seguito da Ampère nella determinazione delle leggi fondamentali dell'elettrodinamica, Maxwell non esitò a schierarsi in favore di quello seguito da Faraday nello stabilire la legge fondamentale dell'induzione.

Dopo aver riassunto le esperienze più importanti di lui e quelle del nostro Felici, che a pochi anni di distanza avevano tenuto dietro alle prime, ed avevano dimostrato in presenza di due circuiti mutuamente induttivi la indipendenza delle *f. e. m.* indotte dalla sezione del circuito e dalla natura della sostanza ond'esso era composto, nonchè la loro proporzionalità alla corrente ed ai numeri di spire induttrici ed indotte, Maxwell riconobbe che la primitiva concezione di Faraday circa lo *stato elettronico* delle sostanze in presenza di correnti elettriche bene aveva preluso alla teoria della polarizzazione del mezzo, da lui stesso formulata, ed accogliendo senza riserve il concetto e la definizione delle linee di forza magnetica, enunciò al § 541 quella che egli chiamò la vera legge dell'elettromagnetismo nella forma seguente:

« La forza elettromotrice totale che, a un determi-
« nato istante, agisce lungo un circuito, è propor-
« zionale al decremento per unità di tempo del nu-
« mero di linee di forza magnetica che attraversano
« il circuito »; successivamente egli chiarì ancora doversi quel numero di linee di forza magnetica intendere equivalente all'integrale della induzione magnetica sopra una superficie qualunque, limitata dal circuito.

Neumann da parte sua fin dal 1845 aveva fondato la teoria matematica della induzione su la legge enunciata da Lenz nel 1834, la quale individua il verso della corrente indotta per il movimento relativo di due circuiti, stabilendo che la sua reazione elettromagnetica deve contrastare in ogni caso al movimento ond'essa ebbe origine. E due anni dopo Helmholtz nella sua celebre Memoria su la conservazione dell'energia, seguito a breve distanza da W. Thomson, dimostrava che la legge delle correnti indotte, scoperta sperimentalmente da Faraday, si poteva dedurre matematicamente da quel principio generale.

In ogni caso la legge enunciata da Maxwell, in quanto si appoggia per intero alle esperienze di Faraday, vale unicamente per i circuiti chiusi, sopra i quali quelle esperienze vennero esclusivamente eseguite; la stessa osservazione è da fare per gli enunciati di Neumann e di Thomson, atteso che il potenziale mutuo fra due circuiti può essere matematicamente definito per i soli circuiti chiusi. Nulla esclude però che una variazione del flusso, concatenato con un circuito, si possa manifestare per il movimento o l'azione di una sola parte od elemento di esso, ed in tal caso la *f. e. m.*, che secondo la legge di Faraday si sa calcolare nei riguardi del circuito intero, evidentemente si potrà attribuire a questa sola parte od elemento.

Ne è così scaturita la seconda enunciazione della legge fondamentale, secondo la quale la *f. e. m.* indotta in un elemento od in un tratto di circuito viene ragguagliata al numero di linee di induzione, che esso taglia nella unità di tempo; anche in tal caso questo numero si intende equivalere all'integrale della induzione magnetica, che attraversa la superficie generata dal conduttore, se questo è in movimento, e, se il conduttore è fisso e in movimento è il campo, vale la stessa definizione con riferimento al moto relativo.

Helmholtz ha dato di questa seconda legge una conferma sperimentale, spostando fra i poli di una calamita un filo metallico, rilegato alle due armature di un condensatore, di cui veniva misurata la carica ed era nota la capacità.

Se si fa riferimento ad un circuito invariabilmente chiuso, ma di cui possa modificarsi la forma o la posizione rispetto ad un campo costante, l'una e l'altra forma dell'enunciato risultano perfettamente equivalenti, attesochè nessuna linea di induzione, figurativamente immaginata nello spazio, può modificare il suo concatenamento col circuito senza intersecare il contorno di esso. La sola incertezza può sorgere quando il campo è esso stesso variabile, come quello che nasce da una corrente primaria di variabile intensità, oppure quando il circuito si intenda chiuso attraverso contatti striscianti, i quali permettano di variarne il contorno, senza che alcun elemento di esso intersechi le linee di induzione, o per lo meno in modo che il numero delle linee intersecate non corrisponda con la variazione apparente del flusso concatenato.

Nel primo caso la legge di Faraday, nella forma enunciata da Maxwell, vale integralmente, e per stabilirne la esatta equivalenza con la seconda forma basta ricorrere alla interpretazione delle linee di forza o induzione, che Faraday stesso ha dato nella seconda serie delle sue ricerche, considerandole in movimento trasversalmente al filo indotto, dal momento che, avendo origine dalla corrente primaria, all'atto dello stabilirsi o del variare di questa esse devono concepirsi espanse dal conduttore primario verso l'esterno o contratte in senso inverso, e si vengono rispetto al conduttore secondario a comportare identicamente a quelle di un campo dotato di movimento relativo. Le condizioni di questo movimento cessano naturalmente, quando la corrente primaria ed il campo si sono stabiliti ad una intensità invariabile; ma il numero delle linee concatenate coincide in ogni caso con quello delle linee, intersecate durante il periodo transitorio dal complesso degli elementi del circuito secondario, e la stessa proprietà vale anche se si vuol considerare il flusso di autoinduzione. È da ammettere in ogni caso che la propagazione delle azioni elettromagnetiche si faccia con velocità finita, come Faraday già aveva intuito, e come Maxwell ha definitivamente dimostrato, applicando alle correnti di spostamento le stesse proprietà di quelle di conduzione.

L'intervento di contatti striscianti rende possibile in infiniti modi, sia l'intersezione delle linee di flusso da parte di elementi di un circuito, mobili in un campo uniforme, senza che il suo contorno apparentemente varii, con che il flusso concatenato si deve intendere matematicamente variabile, e si produce una *f. e. m.* finita; sia la variazione apparente del flusso concatenato, senza che alcun ele-

Digitized by Google

mento intersechi le linee di forza, con che resta esclusa la produzione di qualsiasi *f. e. m.* a linea. Il primo caso interessa la teoria delle macchine omopolari, dove ognuno dei fili indotti, movendosi in un campo di intensità e distribuzione invariabile, ne interseca realmente le linee di forza, e diventa sede di una *f. e. m.*, la quale non può utilizzarsi a mantenere una corrente nel circuito esterno, senza che intervengano pel collegamento i contatti striscianti.

Il secondo caso venne esemplificato mediante esperienze suggestive da Hering e da Blondel, ma non costituisce a sua volta alcuna infrazione della legge fondamentale, come io ho dimostrato a suo tempo in una nota *Sopra l'enunciato più generale della legge dell'induzione elettromagnetica* (1). Sotto questo riguardo il secondo enunciato della legge non sembra soffrire eccezione, ed offre il vantaggio di richiamare l'attenzione sul meccanismo vero della produzione delle *f. e. m.* indotte, quale venne concepito da Faraday e confermato da tutte le esperienze successive, se anche in qualche caso la considerazione del flusso complessivo, concatenato con un circuito e variabile nel tempo, possa condurre ad una valutazione più semplice della *f. e. m.* indotta, che non l'integrazione di quella sviluppata in ogni singolo elemento.

Malgrado ciò la polemica intorno alla validità della legge fondamentale della induzione, ed alla portata ed al valore dell'esperienza di Hering e di Blondel, è continuata fino a questi ultimi anni, nei quali contribuirono a riaccenderla le considerazioni svolte dal primo di questi Autori circa la più verosimile interpretazione di alcuni fenomeni di reostrizione, da lui primieramente osservati nelle fornaci a induzione, ove le vene fluide di metallo subiscono particolari deformazioni al passaggio di correnti elettriche molto intense. Le discussioni, avviate in seno all'Istituto Americano degli Ingegneri Elettricisti, trovarono larga eco nelle Associazioni e nelle Riviste Elettrotecniche Inglesi, Francesi ed Italiane, e non hanno ragione di venire qui riprodotte o riassunte, in quanto sono di data recente, e la parte veramente sottile di esse, più che all'applicabilità della legge di Faraday su le *f. e. m.* indotte, si riferisce a quella della legge fondamentale di Ampère su le azioni elettrodinamiche elementari.

Limitando la considerazione ai fenomeni, che più da vicino interessano le applicazioni elettrotecniche, ogni incertezza nel calcolo delle *f. e. m.* indotte si elimina, facendo ricorso al primo enunciato di Maxwell, ove si tratti di apparecchi statici di trasformazione con campi alternanti e circuiti invariabilmente chiusi. Nelle comuni macchine dinamoelettriche giova meglio considerare le linee di flusso intersecate dal sistema dei fili utili, sopratutto quando questo è rilegato al circuito esterno mediante organi mobili, come i segmenti o gli anelli di collettore in contatto con le spazzole, attesochè la superficie abbracciata e il flusso concatenato sotto un certo riguardo possono apparire matematicamente indeterminati.

In altre macchine, ove la riluttanza del circuito magnetico subisce per il movimento relativo delle parti una parziale modificazione, si cumulano in realtà due sistemi di forze elettromotrici: quelle dovute alla variazione del campo, e quelle dovute al movimento relativo dell'indotto rispetto all'induttore. Nel concetto di Faraday, in quanto si attribuisce anche la variazione del campo al moto relativo delle linee d'induzione rispetto al mezzo in cui esse si sviluppano, entrambe le manifestazioni assumono il medesimo carattere, e si possono ricondurre alla considerazione di un fenomeno unico, al quale il primo enunciato di Maxwell trova più facile applicazione del secondo, sempre che non intervenga alcuna incertezza per la presenza dei contatti striscianti.

Dal punto di vista strettamente scientifico la questione assume una particolare importanza, in quanto si ricollega al caso dei sistemi elettromagnetici a elementi multipli, dotati di moto relativo, e riferiti ad un sistema di assi mobili a loro volta, la cui considerazione rientra nel campo generale della relatività. La questione venne già esaminata da Maxwell, il quale ha dimostrato che il riferimento predetto non ha alcun effetto nel calcolo della *f. e. m.* e della corrente indotta in un circuito chiuso. La questione stessa venne ancora recentemente toccata dal prof. Giorgi, nel corso delle sue discussioni intorno ai lavori di Hering e di Liénard, ma non venne discussa in modo esauriente, sì che una formula generale, la quale esprima la *f. e. m.* indotta in un elemento di circuito, animato da una velocità qualsiasi in un campo di intensità comunque variabile nel tempo e nello spazio, manca tuttora, e non potrà probabilmente stabilirsi senza portare in equazione, oltre ai termini macroscopici della teoria classica, anche quelli microscopici della teoria di Lorenz, che tengono conto del movimento di ogni singolo elettrone internamente ai conduttori.

Appoggiandosi per ora la teoria classica essenzialmente alla concezione del flusso o delle linee di induzione, nasce la domanda: hanno queste linee una esistenza fisica, legata alla sorgente che le produce, ovvero devono unicamente intendersi come una rappresentazione fittizia del campo, così che questo possa altrettanto bene concepirsi astraendo da esse, e caratterizzandone le proprietà mediante semplici espressioni matematiche, indipendenti dal moto eventuale delle particelle, onde sono costituiti i circuiti o le calamite?

Questa questione, fra le più sottili dell'elettromagnetismo, venne una prima volta discussa da Poincaré nel 1890, e ripresa in esame sedici anni dopo da Hove, mostrando che essa non può essere risolta sperimentalmente, attesochè, ove si mantenga in movimento un nucleo magnetizzato in forma di solido di rivoluzione alla presenza di conduttori, parte fissi e parte solidali con esso, come nelle più moderne macchine omopolari, se le linee di induzione ruotano solidariamente al nucleo, vengono intersecate dai conduttori fissi, e se restano ferme vengono intersecate dai conduttori mobili, nè si ha alcuna maniera di riconoscere quale sia la sede precisa delle *f. e. m.* Lo stesso può dirsi ove il campo sia prodotto da un solenoide, ovvero da un complesso qualsiasi di circuiti elettrici percorsi da corrente, nè la di-

(1) *Atti dell'Accademia Pontaniana*, 1916, Volume XLVI. *L'Elettrotecnica*, 15 maggio 1916.

Digitized by Google

stinzione ha oramai più ragione di farsi alla luce delle teorie moderne, le quali considerano le calamite come aggruppamenti di circuiti elementari, percorsi da correnti secondo il concetto di Ampère.

Volendosi definire la *f. e. m.* indotta a la luce di queste medesime teorie, essa deve concepirsi come l'integrale di linea della forza, che da parte del campo si esercita sopra i singoli elettroni, in quanto essi, movendosi solidariamente ai conduttori, equivalgono ad altrettante correnti elementari di intensità proporzionale alla rispettiva carica e velocità. Dovendosi quella forza riferire all'unità di massa elettrica in movimento, scompare dal calcolo il fattore di carica, e resta unicamente quello di velocità, onde la *f. e. m.* per unità di lunghezza risulta semplicemente eguale al prodotto della intensità di campo per la velocità del conduttore in direzione ortogonale.

Se il conduttore indotto al pari di quelli induttori è fermo, e varia il campo con la intensità della corrente da cui questi sono attraversati, non muta la essenza del fenomeno, in quanto quelle variazioni debbono intendersi prodotte da una perturbazione magnetica, che si propaga in senso trasversale, e per effetto della quale il numero di linee intersecate in ogni unità di tempo esattamente si ragguaglia alla contemporanea variazione del flusso concatenato col circuito chiuso.

Sotto questo riguardo la concezione concreta di Faraday può ancora trovare la preferenza di fronte a quella astratta di Helmholtz e di W. Thomson, attesochè essa ci scopre la sede delle *f. e. m.* elementari in ogni parte di circuito, della quale gli elettroni subiscano una traslazione macroscopica di fronte al campo magnetico, laddove l'applicazione del principio della conservazione della energia unicamente permette di prevedere la *f. e. m.* complessiva in un circuito, di cui varia nel tempo il potenziale elettromagnetico.

Il vettore, introdotto da Faraday nella valutazione delle *f. e. m.* indotte, ebbe primieramente il nome di *forza magnetica*, e come tale è ancora caratterizzato nella trattazione di Maxwell; ma, per la funzione che esso compie nella determinazione dell'energia potenziale del circuito, e per la identità che Faraday stesso ha riconosciuto fra il numero delle linee di flusso interne e quello esterno alle calamite, non si ha dubbio che per esso si debba intendere la *induzione magnetica*, e precisamente la risultante del vettore $\mathcal{H}\mu_0$ col vettore $4\pi\mathcal{J}$. In questa espressione si intende per $\mathcal{H}$ la forza polare, che si esercita su la unità della massa magnetica positiva, e viene più comunemente indicata col nome di intensità del campo magnetico; μ_0 è la permeabilità del mezzo, in assenza di qualunque sostanza magnetizzabile, che per convenzione si assume eguale all'unità; $\mathcal{J}$ è la intensità di magnetizzazione della sostanza eventualmente presente, ossia il suo momento magnetico riferito all'unità di volume.

Così intesa, la induzione magnetica risulta omogenea con questa intensità o momento unitario, e non con la intensità del campo magnetico, così come la induzione elettrostatica non si deve intendere omogenea con la intensità del campo, ma col prodotto di essa per il potere induttore specifico, anche se questo nel vuoto si assuma convenzionalmente eguale all'unità.

Il vettore primieramente considerato da W. Thomson, che nell'interno delle calamite si può misurare come intensità del campo entro una scanalatura a faccie piane, infinitamente vicine e perpendicolari alla direzione di questo, è $\mathcal{H} + 4\pi\frac{\mathcal{J}}{\mu_0}$, e venne da lui denominato *forza elettromagnetica*, perchè è omogeneo con $\mathcal{H}$ e si confonde con esso in presenza di circuiti elettrici che non contengono nuclei di materiale magnetico. Al pari di $\mathcal{B}$, che simboleggia la induzione magnetica precedentemente definita, esso ha ancora distribuzione solenoidale, e viene comunemente indicato col simbolo B; la sua unità si identifica con quella delle intensità di campo, laddove la unità d'induzione equivale alla frazione $\frac{1}{4\pi}$ della unità di spostamento magnetico, ed ha le dimensioni di una massa magnetica divise per quelle di una superficie.

Queste definizioni e questi concetti, resi familiari ai tecnici ed agli studiosi della scuola italiana, che li ebbe in retaggio dal suo primo e più grande Maestro G. Ferraris, trovano ancora in una parte della letteratura straniera una interpretazione incerta, la quale ingenera deplorevoli confusioni. La più comune consiste nell'identificare genericamente la induzione con la forza, che si manifesta nell'interno dei corpi magnetizzati, e che, misurata in una intercapedine infinitamente sottile e parallela alle linee di flusso, non differisce da $\mathcal{H}$, laddove in una intercapedine a quella ortogonale assume il valore di B, ma è sempre fisicamente diversa ed eterogenea rispetto a $\mathcal{B}$; equivoci così fatti si trovano anche in alcuni vocabolari di elettrotecnica, e la generalizzazione loro trova essenzialmente la spiegazione nel fatto, che essi non hanno alcuna ripercussione nei calcoli pratici, eseguiti nel sistema di misure, ove la permeabilità del vuoto e dell'aria si pone convenzionalmente eguale all'unità.

Ad eliminare tutte queste incertezze il Prof. Vallot in una recente conferenza, tenuta davanti all'Associazione Elettrotecnica tedesca, ha proposto di distinguere il vettore induzione, attribuendogli un carattere rotatorio. In verità le correnti indotte da ogni variazione di flusso contrastano con la loro reazione elettromagnetica alla variazione medesima, e le forze pondero-motrici, originate dalla presenza di un campo sopra un circuito, tendono in ogni caso ad accrescere il flusso con questo concatenato per effetto della corrente che lo attraversa; perciò l'Autore predetto suggerisce di attribuire al vettore della induzione un senso di rotazione, concorde con quello delle correnti che produrrebbero campo della medesima sua direzione. Non si vede ben chiara peraltro la ragione, per cui un tale verso di rotazione non si bebba egualmente attribuire alla forza magnetica $\mathcal{H}$, che è la causa prima del fenomeno dell'induzione, onde la distinzione introdotta fra i due vettori appare artificiosa e non necessaria.

Altrettanto varrebbe definire la intensità del campo $\mathcal{H}$ come la forza, che in esso si esercita su l'unità di

Digitized by Google

massa positiva, astraendo dalle incertezze che nella definizione di questa possono intervenire alla luce delle teorie moderne; e carattrizzare col nome di induzione quel vettore $\mathcal{B}$, che ad $\mathcal{H}$ è proporzionale con un rapporto, dipendente dalla natura del mezzo e dallo stato della sua polarizzazione, ed alle variazioni del quale si commisurano le *f. e. m.* indotte in ogni circuito immerso nel campo; o più semplicemente ancora si potrebbe definire separatamente lo spostamento magnetico, e individuare la induzione mediante il vettore, che è multiplo di questo col fattore 4π.

Nessuna di queste definizioni, e tanto meno quella proposta dal Vallot, individua peraltro la natura fisica del parametro di permeabilità, che vale:

$$\mu = \frac{\mathcal{B}}{\mathcal{H}} = \mu_0 + 4\,\pi\,\varkappa.$$

Qui $\varkappa$ è il coefficiente ben noto di suscettività:

$$\varkappa = \frac{\mathcal{J}}{\mathcal{H}}$$

la cui definizione si riporta a quella della intensità di magnetizzazione o momento unitario, e della intensità $\mathcal{H}$; la definizione della massa magnetica a sua volta si riconduce a quella della forza ponderale mediante la relazione di Coulomb:

$$F = \frac{m_1\, m_2}{\mu_0\, r^2}.$$

Tutte le grandezze magnetiche risultano così rigorosamente individuate in funzione delle unità fondamentali di lunghezza, massa materiale e tempo, nonchè del coefficiente μ_0, che a sua volta caratterizza la polarizzazione magnetica dello spazio vuoto, a somiglianza di quello ε_0 che ne individua la polarizzazione elettrica.

Assumendo per ε_0 e μ_0 convenzionalmente la unità, il loro valore numerico sparisce dalle formole, ma le equazioni dimensionali di tutte le altre grandezze li contengono implicitamente, e devono intendersi subordinate alla convenzione fatta con criterio completamente arbitrario.

Incertezze e confusioni, pari a quelle segnalate nella definizione delle varie grandezze magnetiche, si incontrano nella determinazione e denominazione delle rispettive unità. La Sezione competente del Congresso internazionale di elettricità a Parigi nel 1900 aveva in verità raccomandato l'attribuzione del nome di *Gauss* all'unità *C G S* di *campo magnetico*, e di *Maxwell* all'unità *C G S* di *flusso magnetico*, senza dare di queste una definizione completa, e la indeterminatezza nella quale rimasero entrambe ebbe per conseguenza parecchi equivoci nel loro impiego da parte dei diversi autori. La interpretazione più generale fu che si dovesse intendere il Gauss come unità del campo di forza $\mathcal{H}$, e il Maxwell come unità del flusso di induzione $\mathcal{B}$, ciò che era anche razionale nel senso, che il flusso di forza avrebbe assunto automaticamente per unità 1 Gauss × 1 cmq, e il campo di induzione 1 Maxwell : 1 cmq. Questo peraltro non ha impedito a Hospitalier, che fu a suo tempo uno dei più fervidi agitatori della questione internazionale su le unità, e in particolare ne fu relatore al Congresso di Parigi, di adottare per suo conto il Gauss come unità di induzione ed il Maxwell come unità di flusso di forza magnetica, trascurando nella determinazione delle loro dimensioni completamente la permeabilità del mezzo di riferimento. Altri volle differenziare l'unità di flusso di forza magnetica, attribuendole il nome di Weber, e l'unità di forza magnetomotrice, che rappresenta il prodotto o integrale della forza magnetica per uno spazio, col nome di Gilbert; il nome di Weber si trova però dall'Associazione Britannica applicato all'unità pratica di flusso di induzione, e da altri all'unità di massa magnetica, che impropriamente è detta *unità di polo*, così che l'unità di forza magnetica viene da questi autori ragguagliata a una $\frac{dina}{weber}$.

Per eliminare tutte queste incertezze e discrepanze è da auspicare un accordo internazionale, a facilitare il quale gioverebbe probabilmente il ritorno al concetto primitivo, sancito dai Congressi anteriori al 1900, di lasciare senza nome speciale le unità del sistema assoluto *C G S*, e di riservare un appellativo alle unità pratiche, in quanto differiscano dalle assolute. In questo caso si giustificherebbe l'adozione definitiva del nome di Maxwell per l'unità di flusso di induzione, intesa peraltro come 10^8 unità *C G S*, atteso che questo multiplo ricorre in tutti i calcoli delle *f. e. m.* indotte; tale appellativo ricondurrebbe opportunamente il pensiero al grande fisico inglese, che meglio di ogni altro ha contribuito a fissare in forma matematica e rigorosa la legge fondamentale della induzione elettromagnetica, seguendo le orme di Faraday, al quale ne è dovuta la primitiva scoperta.

A. Naccari, il quale ha pubblicato nel 1908 pei tipi dei F.lli Drucker di Padova *La Vita di M. Faraday*, onde si trassero parecchie delle notizie qui riportate, dopo avere accennato nell'ultimo capitolo alla enorme importanza delle applicazioni scaturite da questa scoperta, fu indotto alla seguente riflessione: « Fu detto che la scoperta del Faraday senza la in- « venzione del Volta sarebbe bastata a darci tutto « l'odierno progresso in fatto di applicazioni elettri- « che. La cosa a rigore è vera, ma senza l'opera del « Volta, senza la corrente della pila, avrebbe il Fa- « raday fatto la scoperta dell'induzione magneto « elettrica? » A. Naccari però saggiamente conclude, considerando tale questione come insolubile e oziosa.

Ora l' Italia, che invita i fisici e gli elettrotecnici di tutto il mondo a onorare la memoria del Suo Grande, non intende sminuire la parte che altre Nazioni hanno avuto nello sviluppo meraviglioso di questa disciplina, ma giustamente rivendica la gloria di aver dato i natali a Colui, che ha saputo precorrere i tempi, e dischiudere col lampo del suo genio una via completamente nuova al progresso dell'umanità.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. MICHELE LA ROSA
ISTITUTO FISICO R. UNIVERSITÀ DI PALERMO

CALORE ED ELETTRICITÀ

Digitized by Google

Digitized by Google

Un amatore di classica erudizione, nel tracciare lo schizzo delle tappe, storicamente più salienti, percorse dalle nostre conoscenze intorno ai rapporti tra elettricità e calore, potrebbe tentare con successo, di frugare nel patrimonio culturale più antico.

La vecchia osservazione — riferita da Talete intorno al 600 a. C., (ma non sappiamo da qual momento venuta veramente alla conoscenza dell'uomo) — sulla virtù attrattiva acquistata dall'ambra per strofinio, poneva già - si può dire - la questione dei rapporti fra la nuova manifestazione conseguente allo strofinio ed il vecchissimo modo di produrre il fuoco, o quanto meno un *riscaldamento*.

Ma un punto di partenza così lontano, che offrirebbe largo e piacevole interesse a coloro che si dedicano all'indagine della vita e del pensiero dei nostri avi remoti, non conviene certamente a chi abbia, come me, il compito di riassumere in poche pagine, non solo il quadro storico dello sviluppo del mentovato soggetto, ma di presentare in forma largamente accessibile i fatti fondamentali, e di illustrare i loro legami.

D'altra parte le prime osservazioni, fatte con intendimento strettamente scientifico, sugli *effetti calorifici* dell'elettricità in moto, datano solo dall'epoca della costruzione delle prime macchine elettriche a strofinio, cioè dalle prime conoscenze della *scintilla elettrica* (1).

Per molti anni, a partire dalla scoperta della *Bottiglia di Leyda* (1746) — scoperta che fornì il modo di produrre scariche nutrite, ed il primo mezzo semplice e rigoroso di mettere in giuoco quantità di elettricità secondo rapporti noti — l'attività degli studiosi si limitò alla preparazione di esperienze, dirette a mostrare, spesso in modo brillante, l'azione termica della scarica.

Veri studi sulla *misura* dell'effetto termico e sulla ricerca delle sue relazioni con la quantità di elettricità e con gli altri elementi del fenomeno *scarica*, comparvero solo alcuni anni dopo la scoperta della *pila*; o più esattamente, dopo la constatazione dello sviluppo di calore in tutti i punti del circuito in cui aveva sede il flusso continuo di elettricità, determinato da quella.

Sembra che sia stato Cuthberson il primo ad avere, per lo meno intravista la legge di proporzionalità fra l'effetto termico della *scarica* ed il quadrato della quantità di elettricità. Egli misurava quello dalla lunghezza di un filo di ferro di diametro costante che veniva fuso, e questa per mezzo *di un elettrometro a peso* (1). Tale risultato veniva poco dopo (1826) ritrovato con mezzi più idonei da Snow Harris — il quale impiegò un *termometro ad aria*, per la misura dell'effetto termico, e la *boccia di Lane* per quella della carica elettrica — ma fu in modo rigoroso e definitivo accertato (1835-37) dal Riess, il quale riuscì anche a provare la proporzionalità inversa fra calore prodotto e capacità della batteria (a parità di carica) e la proporzionalità diretta del calore sviluppato alla resistenza del tratto di circuito soggetto alla misura.

Contemporaneamente venivano intraprese le prime misure dello effetto termico della *corrente continua*, che restavano senza frutto, un po' per l'imperfezione dei mezzi sperimentali, e molto più per la impostazione stessa delle ricerche, le quali, prive della guida della concezione energetica del calore, si indirizzavano più alla misura delle temperature, anzichè a quella delle quantità di calore. Il solo risultato che meriti ricordo è dovuto a Children (1815), il quale riuscì a provare che fili di natura diversa e delle stesse dimensioni, si riscaldavano differentemente, quando erano traversati dalla stessa corrente.

Bisogna giungere a Joule (1841) per trovare le prime esperienze, correttamente concepite, sulla misura del calore sviluppato, e sulle leggi che lo rilegano alla corrente; esperienze che condussero alla precisa enunciazione della *legge di Joule* malgrado qualche imperfezione nella pratica esecuzione delle ricerche, tanto che le misure posteriori — di Becquerel, Lenz, Botto — non furono che di conferma, e non vantano miglior merito, che quello di avere dato dei valori più esatti del *rapporto di equivalenza* fra energia e calore. Nondimeno, la deduzione teorica della legge di Joule dal principio di conservazione è di parecchi anni dopo, ed è opera di Clausius (1852).

Conviene qui aggiungere che, per molto tempo,

(1) La prima esperienza sugli effetti termici della scintilla viene attribuita a Crist Fr. Ludolf (1744).

Benchè il C. - come gli altri sperimentatori dell'epoca - non avesse chiara l'idea della necessità di riferirsi alla « quantità di calore » veniva in tal modo realizzato un mezzo che a misurare questo elemento serviva, per quanto in modo grossolano. Questa la ragione inopinata del successo.

Digitized by Google

queste ricerche sull'effetto termico dell'elettricità in moto, ebbero di mira la produzione di temperature sempre più alte; in particolare la fusione dei corpi *refrattari*.

Fin dal 1749, Franklin descrisse la nota esperienza della vaporizzazione di una sottile foglia d'oro, inclusa fra due lastre di vetro, ed attraversata dalla scarica di una bottiglia di Leyda. Van Marum e Noirne, e più tardi Beccaria e Priestley ottennero — sempre per via della scarica — la fusione di fili sottili di ottone, ferro, argentana; Riess riuscì ancora a provocare la volatilizzazione di fili di palladio, di argento e di platino.

Effetti analoghi venivano più tardi conseguiti per mezzo della corrente, e venivano intrapresi studi quantitativi per rilegare la temperatura raggiunta all'intensità della corrente, alle dimensioni del filo ecc. Ma anche questi studi rimasero privi d'interesse per la mancanza di risultati generali, naturale conseguenza dell'imperfetta determinazione delle condizioni sperimentali e delle conoscenze, ancora insufficienti, sulle leggi dell'irraggiamento.

Contemporanei a questi studi sono i primi tentativi di applicare l'effetto termico alla misura della corrente. Si pensò dapprima (De la Rive) di far passare la corrente in una spirale di Bregnet; si ricorse poi (Poggendorff ed altri) ad un dispositivo simile a quello impiegato da Riess per la misura dell'effetto termico della scarica, e si utilizzò, infine, (Hankel, 1848) la dilatazione di un filo attraversato dalla corrente, amplificata da un opportuno sistema di leve; metodo questo, che convenientemente perfezionato viene impiegato negli strumenti a filo caldo.

L'idea dell'applicazione all'illuminazione elettrica, concettualmente immediata, non potè affermarsi che alquanto più tardi, per la troppo naturale ragione che vi si potè seriamente pensare solo quando si ebbe in mano la possibilità di produrre correnti molto intense, con mezzi praticamente semplici e poco costosi; quando, con l'invenzione della dinamo, la corrente elettrica entrò nel terreno industriale.

Ma di questa applicazione, come delle altre al riscaldamento di forni, stufe ecc. non tocca qui di trattare.

A noi resta il compito di ricordare che l'effetto Joule costituisce anche oggi il mezzo più semplice e sicuro per ottenere le più elevate temperature. In astratto non vi sono, infatti, ragioni che possano imporre un limite all'innalzamento di temperatura di un conduttore attraversato da corrente, o da scariche convenientemente intense.

In concreto è la limitata resistenza al calore dei corpi conosciuti che costituisce la barriera che non consente di realizzare in laboratorio temperature così alte come quelle che vengono attribuite a certe stelle (60.000° ?).

Ma operando in condizioni opportune, cioè prendendo, per così dire, di sorpresa il conduttore, lanciandovi in una durata brevissima quantità assai cospicue di energia elettrica, è stato possibile ottenere delle temperature alquanto superiori a quella dei crateri dell'arco e verosimilmente assai vicine alla temperatura del Sole.

Formando un corto circuito, sopra un cilindretto di carbone (di 2 o 3 mm. di diametro e 30 di lunghezza, accuratamente depurato col mantenerlo per molte ore a circa 1000° in corrente di cloro) si sono ottenuti interessanti fenomeni di fusione che non si hanno affatto coll'arco (1).

Se il corto circuito viene realizzato in modo graduale, per esclusione di una conveniente resistenza, il bastoncino di carbone che passa dal rosso al bianco, si avviluppa di una guaina di vapore fortemente luminoso e jonizzato, si rammollisce e si piega sotto l'azione del propio peso, o di un opportuno contrapeso. Se il corto circuito è rapidissimo, si vede il cilindretto esplodere, in seno ad un'aureola estremamente luminosa. Disponendo, allora, in prossimità del cilindretto degli opportuni ripari, p. es. una capsula di porcellana, si constata, ad esplosione avvenuta, che sulle pareti della capsula, si sono prodotte qua e là delle chiazze, come di qualche cosa spruzzato e rimasto fortemente attaccato. L'esame di questo materiale aderente alle pareti dimostra che esso è costituito da grafite assai bene cristallizzata in laminette esagonali, e ben distinta dal materiale amorfo che costituisce i frammenti del cilindretto e dal lieve deposito di nero fumo che tappezza la capsula. Ciò prova che tali spruzzi provengono dal carbone liquido formatosi all'interno del cilindretto là dove più si addensano le linee di corrente, creando le condizioni di temperatura e di pressione che occorrono per la fusione di questo corpo.

Temperature ancora più elevate è stato possibile raggiungere mercè l'effetto termico della scarica brusca di una grande batteria di grosse boccie di Leyda (2); e sopratutto col dispositivo dell'arco di Duddell, opportunamente modificato (3), con l'accrescere molto la capacità (fino ad 80 micro farad) e col diminuire moltissimo l'induttanza e la resistenza del circuito derivato.

Malgrado l'assenza di un periodo proprio del circuito derivato ai suoi poli, l'arco mantiene un regime di carica e scarica del condensatore, in cui *la potenza media spesa per unità di massa* prende valori altissimi, generando temperature assai più elevate di quelle trovate nell'arco voltaico e nel suo cratere positivo, sotto tutte le condizioni d'intensità di corrente, di pressione ambiente, ecc.

Ciò è provato dalla costituzione spettrale della luce emessa e dai fatti irrefragabili di fusione del carbone che si presentano nei due metodi e che mancano affatto nell'arco elettrico, sotto tutte le condizioni (4).

---

(1) Questo modo di sperimentare è stato proposto nel 1910 da LA ROSA (cfr. *N. Cimento* S.V. vol. XX) ed è stato applicato a vari metalli da Anderson con la veduta di riprodurre in laboratorio le condizioni di emissione delle stelle (cfr. *Astr. Jour.* vol. LI, 1920; e vol. LVII, 1923.

(2) Cfr. La Rosa. - 1909. *N. Cimento* S. V. vol. XVIII.

(3) La Rosa. *Mem. R. Acc. Lincei*, 1908, S.V. vol. VII.

(4) Annunziata pretesa funzione del carbonio nell'arco a pressione inferiore all'atmosfera dal LUMMER (Verfl. ecc. Vierveg, 1914) è risultato frutto di certe particolari illusioni visive che si possono facilmente avere nell'osservazione diretta dei crateri (cfr. La Rosa *N. Cimento* S. 6, XII, 1916.

Digitized by Google

Effetto Peltier. - Sembra che si debba a Children (1815) la prima notizia della nascita di una differenza di temperatura fra i punti di contatto di un circuito bimetallico percorso da corrente. Ma si tratta della constatazione fortuita di un fatto che fu ritenuto particolare della disposizione su cui era stato osservato e privo d'importanza.

Il fenomeno, concepito già come fatto generale, fu descritto *ex novo* nel 1834 da Peltier; e fu studiato tosto dallo stesso Peltier, da Lenz, e Becquerel che ne trovarono la misura in varie combinazioni bimetalliche, ed anche in alcune leghe, riuscendo a stabilire che la sua entità diveniva tanto maggiore quanto più i due metalli a contatto erano lontani nella *serie delle tensioni* di Volta.

Ma lo studio minuto e rigoroso del fenomeno fu iniziato dopo le ricerche teoriche di Clausius e di W. Thomson, le quali misero in luce l'importan za grandissima che esso acquista sul terreno della nuova teoria del calore e il partito che se ne poteva trarre per confermare le leggi termo-dinamiche. Vennero così le misure di Quintus Icilius e di Frankenheim, prima, e quelle più estese e più perfette di Jahn, Naccari e Bellati, Battelli, Waltenhofeu, Le Roux, Edlund, ecc. le quali confermarono l'esattezza delle relazioni teoriche. Misure più recenti e molto accurate hanno dimostrato però che i valori delle f.e.m. di contatto che si ottengono per questa via differiscono notevolmente da quelli forniti dalla misura diretta. Questa constatazione è teoricamente molto importante, perchè mentre da un lato sembra che dia ragione all'opinione di Volta sull'esistenza di f.e.m. per il puro contatto di due metalli, d'altro canto lascia una larga parte alle argomentazioni di coloro che hanno cercato nell'azione chimica del gas ambiente sul metallo, l'origine delle differenze di potenziale di contatto. Di ciò avremo ancora occasione di dire qualche parola.

L'*effetto Thomson* è strettamente connesso con lo effetto Peltier. Fu previsto per via teorica dal Thomson nel 1853 e da lui stesso per la prima volta osservato nel 1856.

Consiste nel trasporto di calore, operato dalla corrente elettrica lungo un filo conduttore omogeneo, il quale possiede nei diversi punti temperature differenti.

Precisamente: per certi metalli avviene che la corrente prende calore dalle porzioni del filo in cui le temperature sono crescenti (nel senso della corrente) per cederlo alle porzioni in cui sono decrescenti; per altri avviene il contrario. Nei primi, detti positivi (rame), il calore vien preso dalle regioni in cui il flusso termico ha verso contrario di quello elettrico e viene trasportato in quelle nelle quali l'uno e l'altro flusso hanno lo stesso verso; negli altri, detti negativi (ferro), avviene il contrario. Causa del fenomeno, secondo le vedute dello stesso Thomson, sarebbe l'eterogeneità creata fra le diverse sezioni del conduttore dalle differenze di temperature esistenti: eterogeneità che sarebbe sufficente a produrre vere forze elettromotrici di contatto, bastevoli a dare ragione dello sviluppo od assorbimento di calore (secondo la natura del metallo) provocato dal passaggio della corrente. Supposto, anzi, che la f.e.m. esistente tra due sezioni vicinissime sia proporzionale alla differenza dT fra le loro temperature, secondo una costante σ (che fu detta con denominazione poco felice *calore specifico d'elettricità*) si ottenne per la quantità di calore sviluppato in un secondo la relazione:

$$= J \sigma i \, dT$$

Questa relazione è stata sottoposta al controllo sperimentale da Le Roux, Hoorweg, Bidwell, Haga, Trowbrige e Penrose, Battelli. La difficoltà delle misure e la piccolezza dello effetto hanno però permesso una conferma generica della legge, ma hanno lasciato incerti i valori delle costanti; cosicchè non concordano ancora le serie secondo cui i vari metalli sono stati ordinati dai diversi sperimentatori, tenendo conto del segno e della grandezza delle σ.

In complesso abbiamo tre *fenomeni termici dipendenti dal moto dell'elettricità*, di cui il primo ha nettamente le caratteristiche di un fatto di degradazione (dipendente da una specie di attrito) tipicamente irreversibile; mentre gli altri due ci si presentano come l'associazione di due trasformazioni tendenti a risultati opposti, cioè nel complesso come un processo reversibile.

L'esistenza di fenomeni elettrici dipendenti da cambiamenti nello stato termico, fu accertata assai prima della scoperta dei precedenti fenomeni, ed assai prima che considerazioni come queste or ora accennate avessero potuto trovare posto nella scienza.

Una vecchia notizia di Plinio ci insegna che era nota agli antichi *una pietra dura che scaldata al sole, o strofinata fra le mani, acquistava la proprietà di attirare e poi respingere dei corpuscoli leggeri*. L'esistenza di una pietra di tal genere ci è stata esattamente indicata soltanto nel 1707, per notizia dataci da Daumius, che riscontrava la descritta proprietà nella *tormalina;* importata da viaggiatori olandesi pochi anni prima da Ceylan.

Ma la natura elettrica di queste forze fu riconosciuta mezzo secolo dopo (nel 1756) da Aepinus, il quale dimostrò che il cristallo presentava sempre due poli elettrici opposti, in posizione niente affatto casuale, ma legata intimamente alla forma cristallina. Con questa constatazione ebbe inizio la lunga serie di studi sulla *piro-elettricità* (1757).

Canton riconobbe che non lo stato termico raggiunto, ma il cambiamento avvenuto era causa del fenomeno elettrico; che il raffreddamento faceva nascere poli di nome opposto, e nelle stesse posizioni rispetto a quelli prodotti dal riscaldamento; che, rotto il cristallo, si riscontrava che la polarità preesistente era posseduta da tutti i frammenti; e scoperse infine che il fenomeno era presentato anche dal topazio.

Da allora le ricerche furono estese a tutti i corpi cristallizzati, per opera di parecchi studiosi, fra i quali meritano menzione: Häuy, Brewster, Hankel, Gaugain. Si credette dapprima che il fenomeno fosse

Digitized by Google

intimamente vincolato ad una particolarità importante dei cristalli: l'emimorfismo; ma si potè accertare in seguito che esso costituisce una proprietà generale dello stato cristallino, perchè è presentato da tutti i corpi cristallizzati, quando condizioni speciali di conducibilità della superficie non ne impediscano la manifestazione; anche da quelli del sistema del cubo, per la differenza fra assi delle faccie ed assi degli spigoli.

Più tardi furono intraprese delle ricerche quantitative (Gaugain e Riecke) sulla densità della carica prodotta e sulle sue leggi, e fu accertato che essa dipende dalla *velocità del cambiamento di temperatura*; ma gli altri risultati ottenuti non comportano tuttavia delle conclusioni di ordine generale, malgrado gli sforzi di insigni studiosi (come W. Thomson, Wiedeman, Riecke, Lippmann, Duhem, P. Curie, Voigt ecc.) che con scarso frutto hanno tentato di stabilire una teoria del fenomeno.

Il più recente, ed anche il più degno di attenzione, di questi tentativi teorici è quello di Voigt, che fa dipendere le manifestazioni elettriche delle molecole cristalline, non da una polarità intrinseca — così come era stato ammesso dai predecessori — ma dalle loro deformazioni (rilegando così il fenomeno nostro a quello della piezo-elettricità): però egli stesso ha dovuto convincersi più tardi che l'azione diretta del cambiamento di temperatura, deve intervenire in molti casi, almeno per una frazione notevole dell'effetto totale.

Un ulteriore cenno su questo argomento ancora tanto oscuro non conviene al fine ed ai limiti di questo scritto; sicchè preferiamo occuparci dei fatti più importanti del nostro gruppo: *l'effetto termo-elettrico* e *l'effetto termo-ionico*.

Come si sa il primo fenomeno fu osservato da Seebeck, in un circuito rame-bismuto, nel 1821; cioè parecchi anni avanti la scoperta di Peltier. Fu tosto, dallo stesso Seebeck, riscontrato non solo in tutte le coppie di metalli diversi, ma anche in circuiti di un solo metallo, purchè formati di due pezzi resi eterogenei per trattamento meccanico o termico, oppure ricavati da cristalli diversamente tagliati e disposti. Tenendo conto dell'entità degli effetti osservati e del loro verso (1) egli, per il primo, trovò che i vari metalli risultavano ordinati in una *serie termo-elettrica* che differiva, solo per poche eccezioni (dovute verosimilmente ad impurezze) dalla *serie di Volta*.

La scoperta di Seebeck diede materia, ad un grande numero di ricerche (Yelin, Becquerel, Linar, Botto, Hankel, Nobile, Matteucci, Magnus, W. Thomson, Le Roux ecc.) dalle quali vennero in luce: la legge dell'indipendenza degli effetti dalla presenza di metalli intermedi; quella dell'additività delle f.e.m. per intervalli contigui di temperatura; la conferma della coincidenza della serie termoelettrica con la serie di Volta; la proporzionalità fra corrente e differenza di temperatura che ha luogo per motle coppie, dentro ristretti limiti di temperatura; e molti altri particolari, riguardanti il fenomeno nelle leghe, nei corpi non metallici, nei liquidi, ecc....

Il fatto più saliente — osservato prima da Cumming e descritto esattamente da Becquerel — riguarda l'andamento presentato dalla f.e.m. termoelettrica per differenze di temperatura sempre più grandi.

Becquerel riferisce, che mantenendo una delle giunture di una coppia *Fe/Cu* a 0°, ed elevando a partire da questa, la temperatura dell'altra, si osserva che la corrente cresce dapprima pressoche proporzionalmente alla differenza ($t°$—0°); poi cresce sempre più lentamente sino ad un massimo, che viene raggiunto a 140°, quindi decresce, si annulla a 300°, ed infine si inverte a temperature più alte. E riferisce ancora, che se la temperatura comune delle giunture, all'inizio dell'esperienza è di 100°, la corrente raggiunge il massimo sempre a 140°, ma si inverte — conseguenza naturale della legge di additività — non più a 300°, ma 100 gradi più in basso.

La legge generale di dipendenza della f.e.m. dalla differenza di temperatura:

$$E = a\ (t_1 - t_2)\ \left(T_0 - \frac{t_1 + t_2}{2}\right)$$

intravista già da Draper (1840), Hankel (1844), Regnault (1847), Gaugain (1862) fu data nel 1863 da Avenarius, e fu largamente confermata da esperienze di Tait, Kohlrausch ed Ammann, Knot, Mac Gregor, Naccari e Bellati, Battelli, ed altri; e più recentemente per particolari scopi di misura di temperatura, da Jäger e Diesselhorst e da Holborn e Day. Malgrado la larga, e quasi generale, applicabilità della legge, queste esperienze hanno messo in luce dei casi di eccezione, che diventano sempre più frequenti a temperature alquanto lontane dalle ordinarie.

Tentativi di applicazione dell'effetto termo-elettrico sorsero assai presto, e con l'ambiziosa speranza di costruire veri generatori industriali di corrente elettrica.

Sono dovuti allo stesso Seebeck, a Oersted, Fourier, e parecchi altri; ma la piccolezza delle f.e.m. e dei rendimenti hanno fatto abbandonare da un pezzo tali speranze. Però non mancarono di affermarsi alcuni tipi destinati a scopi ristretti e molto speciali, come le pile di Noè e di Guecher, per scopi di laboratorio, le pile di Mure e di Clamond per piccole officine di galvanoplastica ecc.

L'applicazione veramente utile, e di importanza capitale per lo sviluppo di una parte della nostra scienza, è quella delle misure di temperatura e di energia raggiante.

Come è a tutti noto, la pila termo-elettrica — costruita per la prima volta a scopo di misura da Nobile, e largamente impiegata da Melloni — è l'organo essenziale della maggior parte degli strumenti industriali e di laboratorio destinati alla misura di temperature, o molto alte o molto basse; è stato ed è lo strumento essenziale nella maggior

(1) Ricordiamo che quando fra due metalli A e B la corrente tormoelettrica ha il verso $A \rightarrow B$, attravrso la saldatura calda, si suole dire comunemente che B è termoelettrico positivo rispetto ad A. Data la piena arbitrarietà di questa convenzione, vi ha, però chi dice che B è termoelettrico negativo *rispetto* ad A.

Digitized by Google

parte delle ricerche fatte nel campo dell'energia raggiante.

I fatti descritti, che dalla loro indole troppo speciale e dalla loro portata pratica limitata sembravano destinati a rimanere come assai secondari nel vasto campo della conoscenza, furono di colpo elevati, per merito di Clausius e di W. Thomson, a un posto assai preminente ; per i legami profondi che lasciarono intravedere con le nuove idee sull'energia; per la brillante conferma a cui si prestarono dei due grandi principi della termo-dinamica : la nuova dottrina a cui dovette piegarsi tutta quanta la scienza.

Entrambi concepirono la coppia termoelettrica come una macchina termica, nella quale il lavoro elettrico può essere creato a spese e mercè trasporto di calore ; e calore può essere prodotto e trasportato mercè spesa di lavoro elettrico. Supponendo, infatti, piccolissima la differenza di temperatura tra i contatti, o la f.e.m. applicata, e trascurando — come diviene allora lecito di fare — la perdita di energia per effetto di Joule, il circuito bimetallico diventa una macchina *reversibile* e soggiace all'impero di quei principii dai quali debbono dunque scaturire tutte le leggi dei fenomeni.

Nell'elaborazione teorica vi è però una differenza fondamentale, poichè, mentre Clausius pensa all'esistenza di f.e.m. e (t), funzioni della temperatura, solo nel contatto dei due metalli eterogenei, Thomson — oltre a queste — immagina l'esistenza di infinite altre f.e.m. agenti fra sezioni contigue dello stesso metallo e dovute al gradiente di temperatura.

E questa differenza iniziale fra le due concezioni, conduce a differenze importanti nei risultati, poichè mentre la teoria di Clausius, non ha posto che per l'effetto Peltier, come unico inverso dell'effetto termo-elettrico, e conduce alla semplice proporzionalità fra le E e le differenze $(T_2\text{-}T_1)$; quella di Thomson considera l'effetto termo-elettrico come risultante della sovrapposizione degli inversi dei due fenomeni di Peltier e di Thomson, giungendo a due relazioni notevoli fra i tre effetti, e cioè :

$$(1) \qquad q = T \frac{dE}{dT}$$

che rilega la quantità di calore messa in giuoco nei contatti dei due metalli dalla corrente unitaria nel tempo unitario, e la f.e.m. E, della coppia, e

$$(2) \qquad \sigma_1 - \sigma_2 = - T \frac{d^2 E}{dT^2}$$

che rilega le costanti σ_1 e σ_2 dell'effetto Thomson nei due metalli alla f.e.m. Queste relazioni, nell'ipotesi addizionale — di Tait — in cui la σ sia proporzionale alla T, conducono immediatamente alla legge di Avenarius, che corrisponde largamente all'esperienza ; esperienza, che con la verifica dell'esistenza dell'effetto Thomson, aveva già dato una solida base alla seconda concezione.

Altra conferma la teoria ha avuto con la verifica della relazione (2) data da Le Roux, Gore, Battelli, Bansenvein, i quali hanno constatato la soddisfacente validità dentro ampi limiti della proporzionalità fra q e T, ed hanno in particolare cercato di verificare se alla temperatura del *punto neutro* (quella per cui $\frac{dE}{dT} = 0$) la q si annulla. Il controllo esatto di questo particolare è stato dato da La Rosa. A verifica sperimentale è stato pure sottoposta l'ipotesi $\sigma = a\,T$, specialmente da Battelli, il quale ritenne che la relazione è sufficientemente verificata : e poi da Haga, Lewis, King, Hall, Lecher i quali constatarono che la σ contiene spesso un termine correttivo, dipendente dal quadrato di T, ed al quale si possono imputare gli scarti di E dalla legge di Avenarius.

Questo lo stato delle conoscenze sperimentali e teoriche intorno ai rapporti fra calore ed elettricità negli ultimissimi anni del secolo scorso.

Il dualismo concettuale, da lungo tempo dominante nella nostra scienza, non vi era ancora penetrato, ed i nostri fenomeni rimanevano estranei al lavorio intenso e fortunoso, speso da lunga mano, per edificare una soddisfacente immagine meccanica del *reale*. Inquadrati nella cornice fredda, ma pure potente della termodinamica, formavano un insieme organico e soddisfacente.

La scoperta dell'elettrone, e più precisamente la constatazione della sua funzione di *elemento costitutivo universale*, con la conseguente spinta all'elaborazione di un modello elettrico generale della materia, venne a sconvolgere la tranquillità di questa visione puramente astratta, e ad imporre, anche in questo campo, l'elaborazione di un modello concreto. E nel nuovo travaglio i nostri fatti vennero nuovamente a costituire una delle pietre angolati della *teoria elettronica dei metalli*, che è fra i più importanti rami e più ricchi di successo della teoria elettrica della materia.

Ancora prima di venire a quest'ultima tappa del nostro compito, è bene completare il quadro sperimentale con una breve notizia sui *fenomeni termoionici*.

Sono fatti, praticamente importanti, che hanno avuto un grande peso nello sviluppo della teoria, e che da soli bastano a legare questi nostri rapporti fra elettricità e calore, al problema della costituzione della materia.

Dare un cenno della storia di questi fatti, è cosa superflua, attesa la loro freschissima attualità e la bontà delle monografie che vi sono state dedicate. Del resto è storia recente, facilmente ricostruibile e controllabile, che s'inizia — può dirsi — con i lavori di Elster e Geitel (1882-89), dappoichè tutta la conoscenza accumulata fra le prime osservazioni (1730 circa) e questi lavori, si riassume nella semplice constatazione di una conducibilità acquistata dall'aria in prossimità di corpi caldi.

Ma è giustizia riconoscere, che una chiara visione dell'essenza e dell'importanza del fenomeno ed un giusto indirizzo nella sua indagine non potevano sorgere — e non sorsero infatti — se non dopo l'o-

Digitized by Google

pera memorabile di J. J. Thomson, che stabilì su basi, lucide e salde, la conoscenza della conduzione elettrica dei gas.

Il nostro quadro non può abbracciare che l'effetto termoionico puro, cioè l'emissione di elettroni (corpuscoli negativi) dai metalli, o da certi ossidi, riscaldati a temperature elevate, nei migliori vuoti.

Poichè l'emissione di cariche positive, che si osserva su metalli e sali, riscaldati a temperature moderate (fra 200° e 1000°) ed in ambienti non estremamente rarefatti, è da riguardare non come dipendente da una proprietà intrinseca dei corpi, ma come un fenomeno secondario, dipendente dalle loro azioni chimiche con i gas dell'ambiente (1).

La prima constatazione di questo speciale fenomeno è dovuta a Edison, il quale avendo introdotto un elettrodo ausiliare fra le due branche del filamento di carbone di una lampadina ad incandescenza, alimentata da corrente continua, constatò il passaggio di una corrente lungo il filo che rilegava questo elettrodo al polo *negativo* della lampada; la direzione essendo quella dall'elettrodo verso il filamento dentro la lampada. Seguirono presto un tentativo poco felice di spiegazione dovuto a Preece e a Fleming, ed uno, fortunato, di applicazione al raddrizzamento delle correnti alternate, e l'intuizione di una brillante applicazione alla rivelazione delle onde elettromagnetiche, dello stesso Fleming. Lo studio fecondo del fenomeno comincia, però, con le ricerche di Mac Clelland (1899), in quella grande fucina della fisica moderna, che è stato ed è il Laboratorio di Cambridge. Egli riuscì per primo a mostrare la jonizzazione del gas in vicinanza del filo rovente; l'esistenza di una corrente di saturazione; a misurare la mobilità delle due specie di joni. Subito dopo, J. J. Thomson riusciva a realizzare sui corpuscoli emessi dal filo arroventato, la celebre *esperienza delle cicloidi* per misurare il rapporto $\frac{e}{m}$ fra la carica e la massa dei corpuscoli, trovando un valore abbastanza prossimo ($0{,}87 \times 10^7$ u. e. m.) a quello ottenuto per i raggi catodici ($1{,}77 \times 10^7$). Con questa celebre esperienza la natura dell'effetto termoionico fu meridianamente chiarita e le basi della teoria furono saldamente stabilite (2).

Lo stesso J. J. Thomson mise tosto in evidenza il legame che il nuovo fenomeno doveva avere con le altre proprietà dei metalli (precisamente con la f.e.m. di contatto, gli effetti termoelettrici ecc.) delle quali proprio allora veniva dato per opera dello stesso J. J. Thomson, di Riecke, e specialmente di Drude, il primo schizzo teorico, in base alla ipotesi dell'esistenza di *elettroni liberi* in seno al metallo, assimilabili in tutto alle molecole di un gas estremamente tenue, chiuso nello spazio occupato dal metallo. Egli (Thomson) pensò il fenomeno, come lo svincolo di un certo numero di elettroni dal metallo, determinato dall'aumento della forza viva media; svincolo assimilabile ad un'evaporazione degli elettroni, provata dal calore. Su questa base fu fondato subito dopo, dal Richardson, il primo saggio di teoria che diede la nota relazione:

$$(3) \qquad i = a\, T^{\frac{1}{2}}\, e^{-\frac{b}{T}}$$

fra la corrente termojonica di saturazione i emessa dall'unità di superficie e la temperatura T; relazione che è nota sotto il nome di legge di Richardson.

Un'altra deduzione teorica di tale legge, fondata sulla termodinamica dei gas, fu tentata fin dal 1901 da C. T. R. Wilson e fu sviluppata gradatamente dallo stesso Wilson, da Thomson, e dal Richardson, e condusse alla relazione

$$(4) \qquad i = a\, T^2\, e^{-\frac{b}{T}}$$

che non coincide con la precedente a causa dell'esponente del fattore T. Ma, come è noto, l'indole delle ipotesi poste a base di questi tentativi teorici non consente deduzioni certe, sicchè non è possibile preferire l'una piuttosto che l'altra delle due relazioni, ed è stato saggio partito quello di lasciare indeterminato l'esponente della T, e porre:

$$i = a\, T^n\, e^{-\frac{b}{T}}$$

con l'avvertenza che n dev'essere un numero prossimo a 1.

La legge così scritta è risultata in soddisfacente accordo con quasi tutte le numerose misure fatte da Richardson, Langmuir, Dushman, Schlichter, Horton ecc.) le quali però, per la estrema sensibilità del fenomeno termojonico a vari fattori di perturbazione e per la difficoltà delle misure, non consentono una sicura determinazione sperimentale della costante.

Dall'epoca dei primi lavori di Richardson ad oggi il nostro fenomeno è stato oggetto di un grandissimo numero di ricerche, che ne hanno chiarito i particolari più minuti, e che hanno condotto (con la lampada a tre elettrodi) alle meravigliose applicazioni alla radio telegrafia e telefonia che sono ormai alla conoscenza di tutti.

Non è certo il caso di passare in rassegna tanta mole di lavoro e tanta messe di particolari, ci basta ricordare — oltre ai lavori citati e diretti alla verifica della legge di Richardson, ed alla determinazione delle costanti — i lavori diretti a stabilire la forma della relazione $i = f(V)$ per ogni temperatura (curve caratteristiche), dovute allo stesso Richardson, a Smith, Deiningen, Lilienfeld e specialmente a Langmuir, (che si è lungamente occupato del feno-

(1) Come è noto, questi fenomeni hanno riacceso la vecchia fortunosa polemica fra *teoria chimica e teoria intrinseca*; e l'hanno felicemente avviata ad una soluzione di conciliazione, la quale, mentre dà sostanzialmente ragione ai partigiani della prima, riconosce il più alto valore alle argomentazioni degli altri, con l'attribuire una funzione assai importante, ed in certi casi predominante al fattore chimico.

(2) Si sa che questa esperienza fu ripetuta da Owense, da Wehnelt, con il suo metodo, e da altri (Bestelmeyer, Langmuir e Dushman) ed ha con maggiore precisione confermata l'identità del *corpuscolo* emesso dai corpi caldi, con l'elettrone del fascio catodico.

Digitized by Google

neno in vista delle importanti applicazioni), e quelli di Wehnelt, Fredenhangen, Horton, Gehmershausen, Arnold, Davidson, ecc. sull'emissione elettronica da parte degli ossidi dei metalli alcalino-terrosi (catodi di Wehnelt) e di altri composti; emissione che permette di raggiungere valori assai cospicui della corrente di saturazione (di parecchi Ampère) e particolarmente costanti, e che si è prestata ottimamente alla verifica della legge di Richardson, e ad una più esatta determinazione del rapporto e/m (Bestelmeyer) che è riuscita assai concordante con i valori ottenuti per altre vie.

Venendo finalmente al fugace sguardo sulla teoria attuale dei nostri fenomeni, prenderemo le mosse dall'immagine di J. J. Thomson, precedentemente accennata: cioè penseremo che in seno ad un pezzo di metallo sia racchiuso uno sciame di *elettroni liberi* provenienti da una specie di dissociazione a cui gli atomi andrebbero soggetti; elettroni che costituirebbero come un gas tenuissimo, racchiuso nello spazio occupato dal metallo, dotato — secondo alcuni (1) — della stessa forza viva media delle rimanenti particelle metalliche.

Penseremo il doppio strato elettrico — che deve necessariamente formarsi alla superficie del metallo in virtù della tendenza a sfuggire degli elettroni — come una barriera capace di comportarsi, rispetto al moto degli elettroni, come le pareti elastiche del recipiente, si comportano rispetto alle molecole del gas in teoria cinetica.

E ci persuaderemo allora facilmente come alcuni elettroni animati da velocità superiori alla media e dirette normalmente alla superficie libera del metallo, possano allontanarsi e sfuggire; supposto che il lavoro da fare contro le forze elettriche del doppio strato (eV) sia minore o uguale alla provvista di forza viva W, inizialmente posseduta.

Supponendo che il metallo sia circondato da un involucro chiuso, a temperatura uniforme, in cui esista il vuoto perfetto si è condotti a pensare che gli elettroni svincolati costituiscano un *gas elettronico* esterno assai più libero di quello *interno*. Di più tenendo conto del moto termico di questo gas si deve pensare che alcune particelle tornino a battere sul metallo, e vi restino impigliate, nel mentre altre dall'interno del metallo vengono all'esterno. Si comprende così, come debba realizzarsi un equilibrio statico tra elettroni interni ed esterni, manifestamente vincolato alla temperatura. La determinazione delle condizioni di equilibrio, fatta in base ai principi della teoria cinetica dei gas, condusse appunto il Richardson alla formola (3). Pensando invece — come fu suggerito da Wilson — che le proprietà del *gas perfetto* siano applicabili solo al *gas elettronico*, esterno, mentre l'insieme degli elettroni interni sia piuttosto da riguardare come un fluido; pensando che, ad ogni temperatura, all'equilibrio tra questo ed il proprio vapore (gli elettroni esterni), sia applicabile la nota legge di Clapeyron, con l'ipotesi supplementare che il lavoro di estrazione di un elettrone dal metallo dipenda linearmente dalla temperatura assoluta, si giunge alla legge riveduta di Richardson (4).

La spiegazione così costruita dell'effetto termojonico può ritenersi anche oggi soddisfacente ed ha permesso una delle migliori conferme sperimentali della teoria elettronica dei metalli (1).

Egualmente feconda è stata l'applicazione di queste considerazioni alla deduzione delle f.e.m. di contatto fra due metalli diversi ed alla relazione che esse debbono avere con l'effetto termojonico.

Pensando che nel nostro recipiente siano chiusi due pezzi di metallo a contatto, ammettendo, come è naturale di pensare, che a parità di temperatura i due metalli emettono elettroni in misure differenti, è chiaro che una differenza di potenziale dovrà stabilirsi fra i due, che porterà a potenziale più alto quello che perde in una misura più grande. Non è difficile trovare, per mezzo della meccanica statistica, che se sono n_1 ed n_2 i numeri di elettroni liberi contenuti per cm.^{3} nei due metalli nello stato di equilibrio elettrico, T la temperatura uniforme, e V la differenza di potenziale al contatto, dovrà aversi la relazione:

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{n_1}{n_2} = e^{-\frac{eV}{KT}}$$

ossia

$$V = \frac{K}{e} T \log \frac{n_2}{n_1} \qquad (5)$$

dove i_1 ed i_2 sono le intensità delle correnti elettroniche di saturazione date dai due metalli e k la costante dei gas.

Si può aggiungere ugualmente alla relazione fondamentale (5) — a meno di un fattore numerico — indipendentemente dal fenomeno termojonico, pensando (con Riecke e Drude) alla diffusione di elettroni che deve avvenire al contatto dei due metalli per la differenza delle loro concentrazioni elettroniche. È stabilita la (5), si possono facilmente dedurre le leggi dei fenomeni termoelettrici, che collimano in modo soddisfacente con le leggi sperimentali quando si suppone che la concentrazione elettronica, sia una particolare funzione della temperatura. Entrambe le concezioni dànno dunque delle immagini soddisfacenti dei nostri rapporti fra elettricità e calore.

Ma se dal campo delle leggi si discende a quello dei confronti numerici con i dati sperimentali, il buon accordo viene a mancare.

E difficoltà ben più gravi sorgono quando si cerca di estendere il dominio della teoria alle proprietà magnetiche dei metalli, e ai fenomeni che vi accompagnano il movimento dell'elettricità, del calore, in presenza di un campo magnetico; difficoltà che

(1) Si sa che B. Wien, ed altri hanno affacciato la veduta che il principio di *equipartizione* non sia applicabile agli elettroni del metallo.

(1) L'introduzione ulteriore dell'ipotesi dei *quanti* non ha recato notevoli vantaggi. L'ammissione di numerose ipotesi supplementari, che essa richiede rende più aspro e meno solido il terreno di appoggio della teoria.

Digitized by Google

hanno spinto i teorici a continui ritocchi, a numerosi rinnovamenti, a profondi cambiamenti.

Certo, non possiamo tentare qui una rassegna di quanto è stato scritto sulla *teoria elettronica dei metalli;* l'indole dello scritto e la limitazione dell'argomento ce lo impediscono. Ci basta solo di constatare, che nella spiegazione dei *nostri fenomeni*, le diverse incarnazioni della teoria sono abbastanza di accordo, in modo che possiamo essere quasi certi di due cose: 1° che le idee fondamentali comuni alle varie teorie (1) sono conformi all'imagine che della cosidetta *realtà* è lecito oggi di farci; 2° che i fenomeni termo-elettrici ed elettro-termici, sono fra i fatti più elementari, cioè fra i più semplici ed i più generali, che abbiamo saputo isolare dall'intricato e meraviglioso groviglio che costituisce il dinamismo dell'universo.

(1) Queste idee si riducono: all'ipotesi della esistenza di elettroni liberi e vincolati destinati insieme al trasporto dell'elettricità e del calore, soggetti sia alle azioni mutue, sia a particolari azioni per parte della materia.

Digitized by Google

PROF. ALFREDO POCHETTINO

ISTITUTO FISICO R. UNIVERSITÀ DI TORINO

I CONDUTTORI VARIABILI

Digitized by Google

Digitized by Google

1. - Le ricerche sperimentali sul passaggio della elettricità attraverso i diversi conduttori hanno portato, come si sa, a classificare questi ultimi in due gruppi: al primo gruppo appartengono quei conduttori (*conduttori elettrolitici*) nei quali la conduzione dell'elettricità è accompagnata da un vero e proprio trasporto di materia che, quando la forza elettromotrice applicata supera un certo valore, viene reso visibile grazie ai fenomeni dell'elettrolisi. Quindi il passaggio sufficientemente prolungato di una corrente continua produce in questi conduttori un'alterazione chimica. Compresi fra elettrodi metallici, i conduttori di questo tipo presentano il fenomeno della *polarizzazione elettrolitica vera* (1); la loro conducibilità specifica varia al variare della temperatura ed è sensibilmente proporzionale alla temperatura assoluta T. Al secondo gruppo appartengono quei conduttori (*conduttori metallici*) nei quali nessun fenomeno ci rivela che la conduzione della elettricità sia accompagnata da un trasporto qualsiasi di materia e quindi il passaggio comunque prolungato della corrente continua non produce direttamente in essi alcuna alterazione chimica visibile, nè dà luogo a fenomeni di polarizzazione elettrica vera. La loro conduttività specifica decresce al crescere della temperatura ed è all' incirca proporzionale a $\frac{1}{T}$ I conduttori di ambedue i gruppi seguono rigorosamente la legge di Ohm.

Questi sono i caratteri principali delle due classi di conduttori quali risultano dall'esperienza. I tentativi fatti finora per spiegare il meccanismo della conduzione elettrica e per collegare teoricamente i fenomeni di questa con altri fenomeni, anche non elettrici, hanno condotto ad attribuire ai primi una conducibilità di natura *ionica*, ai secondi una conducibilità di natura *elettronica*. La distinzione fra le due specie di conduttori apparirebbe dunque, sia sperimentalmente che teoricamente, ben netta; ma, come avviene sempre tutte le volte che si vuole classificare le varie sostanze rispetto alle loro proprietà fisiche, questa distinzione, man mano che il materiale sperimentale si è andato estendendo, ha perduto di precisione e si è venuta costituendo una terza classe di conduttori che può, in certo qual modo, considerarsi forse come intermedia fra le prime due; a questi conduttori è stato dato il nome di *semiconduttori* o di *conduttori variabili*.

Se per fissare le caratteristiche delle prime due classi ci sono voluti, da Volta in poi, circa cento anni di lavoro sperimentale e teorico copiosissimo, si comprende come sia estremamente difficile per ora stabilire quelle dei conduttori variabili che consistono principalmente nel verificarsi simultaneamente nello stesso conduttore di alcune caratteristiche proprie della prima classe con altre proprie della seconda e per alcuni anche nel non seguire rigorosamente la legge di Ohm; caratteristiche dunque che presentano un complesso intricato di fenomeni, il bandolo del quale non è stato ancora trovato, nonostante il materiale sperimentale straordinariamente abbondante già raccolto. La difficoltà deriva sopratutto dal fatto che la maggior parte di questo materiale si riferisce a sostanze non ben definite dal punto di vista chimico, cioè per lo più a sistemi nei quali è impossibile precisare l' importanza specifica dei singoli componenti.

2. - Ad ogni modo se vogliamo esporre alcune delle principali caratteristiche dei conduttori variabili potremo dire che:

a) essi presentano, in confronto con i conduttori metallici dei poteri termoelettrici eccezionalmente elevati;

b) essi non seguono affatto la legge di Wiedemann-Franz in quanto che il rapporto caratteristico di questa legge può, per molti di loro, raggiungere un valore fino a 10.000 volte maggiore di quello comunemente osservato per i metalli. Ciò non deve stupire perchè tanto il fatto che anche gli isolanti migliori hanno una conducibilità termica apprezzabilissima, quanto la minore variabilità di questa, rispetto a quella elettrica, da sostanza a sostanza, inducono a ritenere che il meccanismo della conduzione termica sia in generale essenzialmente diverso da quello della conduzione elettrica.

c) in essi il coefficiente termico della resistenza elettrica è molto grande; varia fortemente con la temperatura; può, per un certo intervallo di questa, diventare negativo di guisa che, in corrispondenza ad una certa temperatura, si ha un minimo di resistenza. Per spiegare questo comportamento si può (Koenigsberger) immaginare che nei conduttori variabili la conducibilità sia di natura elettronica, ma

(1) Cioè quella in cui la quantità di elettricità corrispondente alla scarica è all'incirca uguale a quella corrispondente alla carica (Voigt).

Digitized by Google

che, mentre nei conduttori metallici la dissociazione (atomo o molecola $\rightarrow$ ione + elettrone) è quasi completa e quindi variabile in misura assai piccola al variare della temperatura, nei conduttori variabili invece sussista un vero e proprio equilibrio (atomo o molecola $\rightleftarrows$ ione + elettrone) dipendente in misura notevole dalla temperatura. Con l'uso delle formole termodinamiche relative ad un sistema composto di una fase solida (reticolo ionico) e di una fase gassosa (elettroni), si arriva alla relazione:

$$N = N_0 \, e^{\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)},$$

ove N indica il numero degli elettroni liberi per cm^3 della sostanza alla temperatura assoluta T, Q indica il calore di dissociazione riferito al grammo-elettrone, R è la costante generale dei gas. La relazione fra la resistenza elettrica r di un conduttore variabile e la temperatura assoluta T diventerebbe allora:

$$r = r_0 \, e^{\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad 1)$$

Siccome però bisogna tener conto della variabilità del cammino medio elettronico con la temperatura, Koenigsberger, assumendo per quest'ultima variazione la relazione empirica che si riscontra nei conduttori metallici veri, completa la 1) dandole la forma:

$$r = r_0 \, (1 + at + b\,t^2) \, e^{\frac{Q}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)} \quad 2)$$

Per $Q = 0$, la 2) rappresenterebbe il comportamento della resistenza metallica pura al variare della temperatura, e per $Q \neq 0$ quella della resistenza de le sostanze a conducibilità diversa da quella del tipo metallico.

Sebbene abbastanza complicata, questa formola non rappresenta sempre in modo soddisfacente i risultati sperimentali; di più se, in base a questi, calcoliamo dalla 2) i valori di Q per le diverse sostanze, essi risultano in molti casi poco verosimili. Si potrebbe pensare di perfezionare la 2) ammettendo (ciò che, per analogia con i fenomeni della dissociazione termica, apparirebbe abbastanza naturale) che Q dipenda da T; si arriverebbe allora ad una formola più complicata ancora, contenente un numero maggiore di costanti, che, per questo solo fatto, faciliterebbe la rappresentazione dei risultati sperimentali, senza però un corrispondente vantaggio dal punto di vista teorico, causa le diverse ipotesi che si dovrebbero fare per la sua deduzione;

d) moltissimi conduttori variabili infine non seguono la legge di Ohm e, quasi generalmente, questa deviazione consiste in un aumento di conducibilità al crescere della tensione applicata;

e) tanto le variazione di conducibilità elettrica per effetto di una variazione di temperatura come quelle per effetto di una variazione della tensione applicata sono reversibili.

Ad ogni modo tutto l'insieme delle proprietà di questi conduttori variabili e sopratutto il loro comportamento rispetto ai fenomeni termoelettrici e galvanomagnetici(1) inducono a considerare questi conduttori come, almeno parzialmente (2), conduttori del tipo elettronico con una concentrazione relativamente piccola di elettroni liberi e fortemente variabile con la temperatura.

La difficoltà pratica di determinare sperimentalmente tutte le modalità del comportamento di un corpo solido rispetto alla resistenza che oppone al passaggio della corrente elettrica e di interpretarle obbliga, se si vogliono ottenere risultati concordanti, riproducibili, a limitare lo studio soltanto alle sostanze chimicamente ben definite e quindi a lasciar da parte i minerali naturali benchè abbiano formato oggetto di numerosissime determinazioni. Inoltre occorre:

a) limitarci a considerare preferibilmente, sempre che sia possibile, i cristalli isolati o unici, senza inclusioni e senza sfaldature interne, poichè nei conglomerati cristallini e nei corpi a struttura microcristallina la conducibilità elettrica è fino a 50 volte (Hevesy) maggiore che non nei cristalli unici della stessa sostanza e solo per questi si trovano valori della conducibilità definiti e riproducibili e la variazione di resistenza con la temperatura ha un significato ben chiaro;

b) escludere assolutamente i casi e le condizioni in cui la sostanza studiata può subire una dissociazione chimica in sostanze a differente conducibilità o in cui si abbiano reazioni con il gas ambiente per le quali risultino composti nuovi a diversa conducibilità;

c) distinguere i casi di conducibilità propria da quelli in cui una sostanza avente conducibilità propria, può, sotto l'azione di un agente esterno (energia luminosa, raggi X, ecc.) assumere una conducibilità talvolta molto maggiore di quella che ha in assenza di quel certo agente; chiameremo *conducibilità impressa* la differenza fra la nuova conducibilità e la conducibilità propria.

3. - L'aver studiato con cura le varie cause di errore che, anche in determinazioni semplici come quelle della conducibilità elettrica, possono presentarsi, ha permesso di classificare nettamente fra i conduttori metallici o fra quelli elettrolitici parecchi conduttori che si consideravano prima come variabili. Così, fissando come criterio assoluto per stabilire la natura elettrolitica della conducibilità di una sostanza quello di constatare se vi è elettrolisi vera e propria in cui sia verificata la legge di Faraday, è stata stabilita sicuramente la natura elettrolitica della conducibilità propria di parecchie sostanze cristallizzate come, ad esempio: $Ba\,Cl_2$ (Haber e Tollutzko); $Ag\,Cl$,

(1) Infatti il rapporto fra il coefficiente caratteristico dell'effetto Hall e la resistenza elettrica specifica, il quale, secondo la teoria elettronica, è indipendente dalla concentrazione in elettroni liberi e quindi deve essere uguale per tutti i conduttori del tipo elettronico, è effettivamente dello stesso ordine di grandezza per i metalli e per quei conduttori variabili su i quali si son potute fare misure attendibili.

(2) In alcuni casi è stata accertata la coesistenza di una conducibilità nettamente elettrolitica con una metallica.

Digitized by Google

Ag Br (Tubandt e Lorenz); *Ag* NO_3, *Pb* F_2, *Pb* Br_2, *Pb* J_2 (Tubandt); salgemma (Seelens); *Na* NO_3, *KCl* (Joffé).

Sembrerebbe dunque di potere, senza correre il rischio di gravi errori, attribuire una conducibilità elettrolitica pura ai sali metallici ed ai composti analoghi, ma ciò non è perchè vi sono numerose eccezioni. Per esempio per il *Cu J*, malgrado le analogie ottiche e chimiche con composti simili a conducibilità di natura nettamente elettrolitica, non si è potuto ancora (Tubandt) dimostrare che la conducibilità sia di questo tipo (1). Poco sicure sono inoltre le nostre conoscenze su la natura della conducibilità degli ossidi e dei solfuri; per molti di questi ultimi si riscontra la tipica deviazione della legge di Ohm consistente in una diminuzione di resistenza al crescere della forza elettromotrice applicata. Singolare è il comportamento del $Ag_2 S$: di questo composto esistono due forme: α $Ag_2 S$ e β $Ag_2 S$, con il punto di trasformazione, reversibile, a 179° C.; la forma β conduce molto meno della forma α anche per temperature molto prossime ai 179° e la sua conducibilità diminuisce al diminuire della temperatura. La forma α subisce l'elettrolisi seguendo la legge di Faraday ed è quindi un conduttore elettrolitico, ma nella forma β sussistono contemporaneamente ambedue le conducibilità, l'elettronica e l'elettrolitica, e si è potuto dimostrare (Tubandt) che la conducibilità totale è per quattro quinti del secondo tipo e per un quinto del primo tipo.

La conducibilità dei sali cristallizzati ha una caratteristica che la differenzia da quella degli stessi sali fusi o disciolti in un solvente ionizzante. Sembra infatti assodato che nei sali cristallizzati la conduzione sia bensì di natura elettrolitica, ma ad essa prende parte un solo ione di guisa che in certo qual modo in essi il meccanismo della conduzione sarebbe simile a quella elettronica in quanto che una sola carica si muovorebbe, però portata da ioni. Già si sapeva che nel vetro ordinario (Warburg e Tegetmaier) si muove il solo *Nä*; successivamente venne dimostrato (Haber e Tollutzko) che nel *Ba* Cl_2 si muove soltanto il *Bä*; nelle zeoliti e nelle permutiti si è constatata una grande possibilità di scambio dei cationi alcalini fra loro e con altri cationi metallici anche plurivalenti, di guisa che si sarebbe indotti a ritenere che in queste sostanze gli anioni formino un reticolato rigido fra le cui maglie i cationi sono più o meno liberi di muoversi. Infatti venne dimostrato (Tubandt) che nel *AgBr* si muove il solo $Ag^{\cdot}$, determinandone addirittura il numero di trasporto che venne trovato uguale all'unità; analogamente per il *Ag J*, *Ag Cl*, α $Ag_2 S$, α *Cu S* (Tubandt) per il *Na* CO_3 (Joffé) e per il salgemma (Seelen) nei quali tutti il numero di trasporto del catione è uguale all'unità.

Non bisogna però credere che ciò valga in generale perchè nel *Pb* Cl_2 si dimostra invece (Tubandt) che solo l'anione è mobile e quindi il numero di trasporto del catione è nullo. Date però le difficoltà grandissime che presentano tali misure non diremo che in queste sostanze cristallizzate un solo ione si muova e l'altro rimanga assolutamente fermo, ma ammetteremo soltanto che sussista una enorme differenza nella mobilità dei due ioni senza che nulla ancora ci indichi una ragione plausibile di questa differenza.

Un'altra sostanza per la quale le ricerche recenti (Brown), compiute su cristalli unici, hanno permesso di fissare il tipo di conducibilità elettrica è la grafite. A 0° C. il coefficiente termico della resistenza elettrica di questo corpo è positivo ed ha all'incirca lo stesso valore che si riscontra nei metalli veri. Cade così l'unica particolarità che rendeva difficile l'attribuzione della grafite ai conduttori elettronici; questa sarebbe dunque una modificazione metallica del carbonio mentre il diamante ne sarebbe la metalloidica. Il coefficiente termico negativo trovato, alla temperatura ordinaria, da tanti sperimentatori, sarebbe dovuto o a struttura microcristallina o alla presenza di sfaldature interne nei campioni studiati, o infine ad impurità.

4. - Una classe di corpi che si è indotti ad annoverare fra i conduttori variabili sono le sostanze cristallizzate a conducibilità estremamente piccola come, per esempio, il quarzo e la calcite. Infatti se è vero che essi possono essere considerati (Joffé) fra i conduttori ionici, essi presentano d'altra parte un comportamento, specialmente alla superficie di separazione con gli elettrodi, che non si riscontra nei conduttori elettrolitici. Se si applica a due elettrodi metallici, comprendenti una lamina di calcite, una differenza di potenziale costante si ottiene una corrente la cui intensità diminuisce con il tempo perchè in corrispondenza si forna una forza elettromotrice di segno contrario a quella applicata e che non ha nulla a che fare con il fenomeno della polarizzazione elettrolitica vera. Joffé, eliminando con opportuni accorgimenti l'influenza di questa forza controelettromotrice, ha potuto dimostrare che i cristalli di calcite posseggono una conducibilità determinata del tipo ohmico, indipendente quindi dal valore e dal segno della differenza di potenziale applicata, *ma variabile lentamente con la durata del passaggio della corrente;* per la calcite, per esempio, la variazione si compie in circa 15 secondi ed ammonta a circa il 10 % del valore iniziale. Quella forza elettromotrice poi può raggiungere un valore di parecchi chilovolta ed è tanto maggiore quanto più è isolante il cristallo; la sua formazione richiede un tempo più lungo alle basse temperature che non alle alte. Essa è dovuta ad una vera e propria carica spaziale, limitata ad uno strato sottilissimo della sostanza nelle immediate vicinanze dell'elettrodo negativo, tanto vero che può essere allontanata completamente portando via uno strato di 1/100 di millimetro dalla faccia della lamina cristallina che era a contatto del catodo durante il passaggio della corrente. Il Joffé immagina che il fenomeno si produca così: la corrente elettrica passa attraverso la calcite grazie alla migrazione dei Cä, casualmente liberi

(1) Dalle ricerche del Baedecker risulta il fatto interessantissimo, ma finora non spiegato convincentemente, che se nel *Cu J* (o nel *A g J*) si scioglie dello Jodio puro, la soluzione solida che così risulta ha le proprietà ed il comportamento di un conduttore elettronico ossia metallico, in modo nettissimo.

Digitized by Google

nel reticolo cristallino del minerale, che si muovono nel campo elettrico verso il catodo, ma non riescono ad attraversare la superficie di separazione con l'elettrodo, non si scaricano quindi e perciò non si ha elettrolisi vera e propria. La migrazione dei Cä non comincia all'anodo perchè, se così fosse, in primo luogo nella regione adiacente a questo dovrebbe formarsi una carica negativa, il che non si verifica e poi perchè se, soppressa la forza elettromotrice applicata, si uniscono metallicamente i due elettrodi, la corrente di scarica che così si ottiene, non ripristina lo stato iniziale, completamente scarico, della lamina, ma fluisce finchè, diminuendo la carica positiva al catodo primitivo e formandosene man mano una nuova di segno contrario all'altro elettrodo, le due cariche non si equilibrano. Non si può d'altra parte supporre che i CO_3'' si scarichino all'anodo altrimenti dovrebbero liberarvisi e dar luogo a sviluppo di CO_2 e di O_2 il che non avviene.

Completamente diverso è il caso del quarzo; invece di una carica positiva addensata in uno strato sottilissimo al catodo, si ha una carica positiva distribuita in tutta la metà che chiameremo catodica della lamina cristallina, e una carica pressochè uguale, ma negativa distribuita nell'altra metà La distribuzione dei potenziali lungo lo spessore della lamina cristallina, allo stato stazionario, assomiglia grandemente a quella che si ha nei gas a pressione ordinaria fra elettrodi piani e paralleli. Non si sa se si possa supporre che nel quarzo esistono ioni liberi (Si''', O'' ?) e questi si muovano con velocità di uguale ordine di grandezza.

Se si determina la variazione di resistenza elettrica delle lamine cristalline a bassa conducibilità specifica con la temperatura, si trova che essa è ben rappresentata dall'espressione:

$$\log c = \frac{A}{T} + B$$

ove A e B sono costanti, la quale relazione non è altro che la formula (1) di Koenigsberger. Ma dalle misure finora effettuate risulta ancora un fatto sperimentale molto interessante e cioè che le rette ($\frac{1}{T}$, $\log r$) corrispondenti ai diversi cristalli studiati come, per esempio: calcite, quarzo, allume ordinario, salgemma, cloruro di Tallio ecc., hanno tutte la medesima inclinazione su l'asse sul quale si riportano i valori di $\frac{1}{T}$; per tutti quei cristalli dunque dovremo ammettere che la costante A ha lo stesso valore il che indurrebbe a pensare che il calore di ionizzazione (molecola $\rightleftarrows$ catione + anione) per essi sia pressochè uguale.

Interessantissime sono le recenti esperienze di Joffé e dei suoi allievi su la migrazione di ioni estranei in un conduttore ionico cristallizzato in quanto gettano luce sul modo con cui avviene la propagazione dell'elettricità in tale specie di conduttori. Si è riusciti, per esempio, a far diffondere sotto l'azione della corrente elettrica il Li in un cristallo di nitrato iodico e a sostituirlo al Na senza che la struttura del cristallo venga visibilmente alterata; bisogna però che il metallo, il cui ione non si vuol far diffondere, sia o fuso o allo stato di amalgama e funzioni da anodo; se è in soluzione, allo stato di comune ione elettrolitico, la diffusione non avviene, forse a causa della solvatazione che ne impedisce l'ingresso nel reticolo cristallino del nitrato sodico.

5. - Esclusi i cristalli ricordati, non abbiamo più veri e propri gruppi di conduttori che si possano considerare come di comportamento differente da quello delle due classi fondamentali e quindi come appartenenti ai variabili; ma piuttosto casi singoli che vanno considerati ognuno di per sè in quanto non si riesce a trovare fra essi alcun carattere comune che ne permetta un aggruppamento qualsiasi.

Secondo quanto è comunemente ammesso, negli elementi sarebbe esclusa a priori la possibilità di una conducibilità ionica, quindi quelli di essi che non hanno conducibilità metallica ben netta devono essere compresi fra i conduttori variabili; così fra questi conteremo lo Jodio il quale segue la legge di Ohm, ma ha coefficiente termico della resistenza negativo. Il caso però più importante e anche più studiato è quello del Selenio, il cui interesse è reso ancora maggiore per il fenomeno della conducibilità impressa provocata dalla luce; per ora ci limiteremo a considerare la conducibilità propria di questo elemento, escludendo quindi qualsiasi azione esterna capace di determinare una conducibilità impressa.

Il Selenio esiste in più forme allotropiche delle quali soltanto la cosidetta grigia cristallina ha una conducibilità apprezzabile galvanometricamente. Questa forma si può ottenere da quella nera vetrosa o dalla rossa cristallina sia per via termica (metodo ordinario di trasformazione), che per via chimica (Schrott). Il Selenio cosidetto grigio cristallino non costituisce un sistema assolutamente omogeneo, ma, come risulta anche all'esame micrografico, è un conglomerato di almeno due modificazioni diverse (Marc) che finora non vennero separate. In generale la resistenza specifica del Selenio grigio cristallino diminuisce il crescere della temperatura; essa varia anche al variare della differenza di potenziale applicata e precisamente diminuisce al crescere di questa (Adams, Pochettino, Ries); tale diminuzione di resistenza non è dovuta ad aumento di temperatura provocato da effetto Joule. La curva rappresentante questa variazione ha una forma molto simile a quella di una parabola il cui asse coincide con l'asse delle differenze di potenziale. Tale effetto della tensione applicata è, a parità di questa, molto più marcato con la corrente continua che non con la corrente alternata (Luterbacher). È da notare che esiste anche una varietà di Selenio grigio cristallino a coefficiente termico della resistenza positivo e quindi, da questo punto di vista, a comportamento apparentemente metallico, ma anch'essa presenta sempre (Ries) un accrescimento della conducibilità al crescere della tensione applicata.

Se si applica una tensione costante ad un conduttore di Selenio grigio cristallino, la conducibilità cresce, dall'istante dell'applicazione, per alcuni mi-

Digitized by Google

nuti (come vedemmo avvenire nei cristalli) e la variazione è più forte con la corrente alternata che non con la corrente continua; anche quest'effetto susseguente non è dovuto (Luterbacher) all'effetto Joule.

Strano è il comportamento di molti composti (per esempio: *Cd O*, *Zn O*, *C Si*, ecc.) che, malgrado la mancanza di un assorbimento apprezzabile nello spettro visibile, hanno una conducibilità notevole (1) e, sembra, di tipo elettronico; infatti un cristallo incoloro di carborundo o un cristallo di ossido di Zinco, sotto una differenza di potenziale di 100 Volta, vengono portati dalla corrente al calor rosso e possono essere attraversati da una corrente di parecchi ampères per cm^2, durante diverse ore, senza subire alterazioni di sorta. Però da ambedue le sostanze la legge di Ohm non è seguita, nel senso che, al crescere della differenza di potenziale applicata, la conducibilità loro aumenta.

Moltissimi ossidi poi hanno una posizione intermedia fra i metalli e gli elettroliti in quanto che, in maggioranza, a basse temperature conducono elettroliticamente e subiscono modificazioni chimiche per vera e propria elettrolisi, mentre ad alte temperature la loro conducibilità diventa nettamente di tipo metallico.

Fra gli ossidi merita particolare menzione l'ossido rameoso la cui conducibilità sembra avere, nei rispetti della variazione con la temperatura, carattere metallico, ma non è costante, come vorrebbe la legge di Ohm, bensì come negli altri casi ricordati, cresce al crescere del voltaggio applicato. Fra i solfuri quello di Antimonio (sia quello naturale, l'Antimonite, che quello artificiale) non segue la legge di Ohm e la deviazione da questa avviene nel solito senso (Luterbacher); di più, come nel Selenio, successivamente all'applicazione di un determinato voltaggio, la conducibilità cresce per alcuni secondi, e questo accrescimento susseguente non è dovuto al calore Joule.

6. - Le modalità con cui si presentano inducono ad annoverare fra le conducibilità variabili quelle impresse da agenti differenti da una variazione di temperatura; il caso più importante è quello della conducibilità impressa dalle radiazioni luminose.

La prima sostanza in cui si rilevò questa singolare proprietà fu il Selenio, ma poi successivamente il numero delle sostanze che si riconobbero presentanti questa conducibilità, cosidetta fotoelettrica è cresciuto ed ora noi possiamo annoverare fra esse: elementi come il Selenio, il Solfo, il Fosforo; sostanze chimicamente ben definite come gli alogenuri d'Argento, gli alogenuri di Mercurio, lo ioduro di Rame, lo ioduro di Antimonio, i solfuri di Antimonio, di Zinco, di Cadmio, di Tallio, il carbonato di Piombo; minerali naturali come il Diamante, l'Antimonite, il Cinabro, la Cuprite, la Bismutinite, la Molibdenite; corpi a struttura complessa come i solfuri fosforescenti preparati alla Lenard, ecc., ecc. Come è naturale un effetto fotoelettrico di tal natura è da attendersi soltanto in quei casi in cui la conducibilità propria risulta piccola; ma, come si rileva dagli esempi citati, esso non è in alcuna relazione con la composizione chimica giacchè si ha negli elementi, nei sali a struttura semplice, ed anche in soluzioni solide complesse. Il legittimo desiderio di raggruppare i fenomeni fisici in classi affini ha spinto a cercare analogie e relazioni, per esempio, fra la conducibilità fotoelettrica e la fotoluminescenza, ma i risultati sperimentali finora acquisiti sono talmente discordanti da non consentire in alcun modo una conclusione ben netta.

Fra le conducibilità impresse dalla luce meritano una trattazione a parte quelle riscontrate nei cristalli isolati di alcune sostanze pochissimo conduttrici, nelle quali la conducibilità al buio è certamente di tipo ionico, mentre la impressa è, almeno in parte di tipo elettronico, e, come si è sempre riscontrato, quanto maggiore è la prima, tanto maggiore è la seconda. Di qui segue che, poichè al diminuire della temperatura la resistenza propria aumenta, la sensibilità fotoelettrica aumenta con il diminuire della temperatura (1). Intanto vien fatto di domandare se la conducibilità fotoelettrica sia propria della sostanza pura oppure di eventuali impurezze. Per esempio nei solfuri fosforescenti di Lenard il campo di eccitazione della fotoluminescenza è costituito dalle stesse λ del campo di eccitazione della conducibilità fotoelettrica e d'altra parte si sa che le λ del primo sono fissate dall'aggiunta metallica attivante. Così il salgemma, la silvina, la fluorite, puri incolori, non sono affatto capaci di condurre fotoelettricamente, mentre diventano tali se, sottoposti all'irradiazione dei raggi X, subiscono la nota colorazione giallastra in tutta la massa, e perdono tale proprietà se, con un riscaldamento prolungato convenientemente, facciamo scomparire quella colorazione. Ma, al contrario, l'azione fotoelettrica è, nel diamante, nel cinabro, e nella blenda, tanto maggiore quanto più il minerale è puro; e se questo è colorato da qualche impurezza l'effetto è minimo proprio per le λ del campo di assorbimento dell'impurezza; così il marcato effetto fotoelettrico del salgemma colorato naturalmente in azzurro non è dato dalle λ del campo di assorbimento dell'impurezza (*Na* colloidale ?) che dà quella colorazione, e se questa viene eliminata per riscaldamento l'effetto fotoelettrico di conducibilità rimane inalterato. Noteremo infine che diversi pezzi dello stesso campione e perfino differenti porzioni dello stesso pezzo presentano l'effetto fotoelettrico con intensità diverse e che alcuni minerali come la Molibdenite, la Bismutinite, ecc., presentano (Coblentz) al microscopio, nelle porzioni in cui l'effetto è più marcato, una struttura microcristallina sensibilmente diversa da quella che si rileva nel resto. Questi esempi contraditori servono a dimostrare come sia impossibile per ora attribuire l'effetto fotoelettrico di conduci-

(1) Viceversa l'ossido mercurico, che presenta un forte assorbimento nello spettro visibile estendentesi fino al rosso, è un discreto isolante.

(1) Fa eccezione, sembra, il cinabro per il quale (Rose) la sensibilità aumenta fortemente al crescere della temperatura.

Digitized by Google

bilità a certe determinate sostanze presentanti particolari, ma comuni, caratteristiche.

Quello che oggi risulta assodato (Gudden e Pohl) si è che l'azione della luce è sempre più o meno selettiva anche se il campo di eccitazione è molto ampio, perchè si riscontrano in tutti i casi, a parità di energia luminosa incidente, massimi di sensibilità ben netti, i quali non si spostano se l'illuminazione eccitatrice, invece che normalmente al campo elettrico, si fa avvenire, usando elettrodi trasparenti, parallelamente a questo; di più se pure questi massimi di eccitazione non coincidono sempre con i massimi di assorbimento, si verificano sempre in corrispondenza a λ per cui l'indice di rifrazione della sostanza è particolarmente elevato ($n > 2$) e si spostano, come le bande di assorbimento verso il rosso al crescere della temperatura. Questi massimi, se riferiamo la curva della sensibilità *a parità di energia assorbita*, scompaiono e la conducibilità fotoelettrica è in alcuni casi come, per esempio, nel Salgemma ingiallito dai raggi X (Joffè) indipendente dalla λ incidente, in altri casi invece (Gudden) decresce linearmente con la λ, diminuendo bruscamente soltanto immediatamente prima di una banda di assorbimento; non si può dunque ritenere che il numero di elettroni liberati sia proporzionale al numero dei quanti di luce assorbiti.

In queste sostanze presentanti l'effetto fotoelettrico di conducibilità, quando siano esposte alla luce coesistono sempre una conducibilità propria di natura, come si è detto, ionica, e una conducibilità impressa che è prevalentemente elettronica. Gli studi di Gudden e Pohl e di altri hanno condotto a risultati importanti, ma che, invece di chiarire il fenomeno della conducibilità fotoelettrica, ne hanno reso molto più difficile l'interpretazione. Al crescere della durata t di illuminazione, l'intensità I della corrente fotoelettrica aumenta secondo una legge che empiricamente risulta della forma:

$$I = I_1 t + I_2 t^2, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad (3)$$

ove I_1 è proporzionale all'intensità luminosa, e, al crescere della tensione applicata, tende ad un valore massimo come di saturazione; I_2 dipende anche essa dalla tensione applicata e dall'intensità della radiazione incidente, ma, come anche la corrente dipendente dalla conducibilità propria (ossia al buio), cresce, al di sopra di certi valori della tensione, molto più rapidamente di questa e più rapidamente anche dell'intensità della radiazione eccitante. Sembra adunque che I_1 dipenda esclusivamente dal numero di elettroni liberati direttamente dalla luce, mentre I_2 dipende da un processo secondario che si verifica non istantaneamente ed è della stessa natura della corrente dipendente dalla conducibilità propria e quindi di natura ionica.

Se della lamina cristallina, compresa fra i due elettrodi, illuminiamo soltanto una parte, si ha una diminuzione della resistenza totale del preparato che non è dovuta soltanto alla parte illuminata perchè la conducibilità della lamina alla luce non potrebbe in questo caso diventare mai, come invece avviene di fatto, un multiplo della conducibilità propria (Röntgen, Gudden e Pohl). Quando si usino piccole intensità luminose e brevi durate di illuminazione, e così si elimini l'influenza del termine $I_1 t^2$, si trova che, come si è detto, la I_1 dipende solo dall'energia totale incidente, non dalla superficie irraggiata, nè dalla posizione di questa rispetto agli elettrodi; se però, sul percorso della corrente, si trova una inomogeneità o una sfaldatura interna, la I_1 subisce una forte diminuzione se queste si trovano fra la parte illuminata e l'anodo; rimane inalterata o diminuisce di poco se si trovano fra la parte eccitata e il catodo. Perciò Gudden e Pohl pensarono che gli atomi (o le molecole) colpiti dalla luce, liberano degli elettroni che, sotto l'azione del campo esterno, si muovono anche nelle parti non illuminate finchè non si formino delle cariche spaziali generanti un campo, contrario a quello esterno, che finisce per compensare quest'ultimo.

Qui è anche opportuno ricordare una particolatità presentata dal Diamante, e che si trova in parecchi conduttori fotosensibili: il Diamante è ordinariamente insensibile alle radiazioni di $\lambda > 600\,\mu\mu$, ma viene fortemente eccitato dal rosso e dall'ultrarosso se prima lo si è esposto a radiazioni di λ breve. Dunque l'atomo di carbonio del Diamante non subisce l'influenza di raggi a λ lunga, ma la corrente previamente eccitata con le λ corte provoca la formazione di atomi modificati dai quali anche le λ lunghe possono liberare elettroni. Se si opera con forti intensità luminose e con notevoli durate di irradiazioni, il termine $I_2 t^2$ prevale e i fenomeni mutano d'aspetto anche perchè in tal caso si fa sentire l'influenza delle cariche spaziali che si formano nell'interno del cristallo. La caduta di potenziale fra i due elettrodi non è più lineare; non è più indifferente la posizione della zona illuminata rispetto agli elettrodi; si fa sentire un *effetto di inerzia*, cioè le variazioni della corrente non seguono più immediatamente le variazioni di intensità della radiazione eccitatrice; infine si osserva sempre che quando la corrente fotoelettrica è passata per un certo tempo in una direzione e la sua intensità, causa le cariche spaziali, è fortemente diminuita, se si rovescia il senso della tensione applicata E, si ha, nei primi istanti, una corrente molto più forte di quanto corrisponderebbe al valore di E perchè con E cospira la tensione provocata dalle cariche spaziali. Che la diminuzione della corrente durante una illuminazione prolungata sia legata alla formazione di queste cariche spaziali, non vi è dubbio; ma deve verificarsi contemporaneamente anche un secondo fenomeno dovuto verosimilmente ad una modificazione specifica della sostanza provocata dalla luce; infatti questa diminuzione non dipende esclusivamente dall'intensità della corrente fotoelettrica, ma anche dalle λ eccitatrici. Nei minerali fotosensibili questo effetto (che, per il suo senso, diremo *fotonegativo*) cresce (Coblentz) al crescere della tensione applicata: in campi deboli è molto piccolo e presenta una grande inerzia a manifestarsi, ma per tensioni forti supera talvolta l'effetto primario di guisa che, all'illuminazione, l'intensità della corrente che si è stabilita al

Digitized by Google

buio, diminuisce. Già questo fatto contradice all'ipotesi di una polarizzazione, vera o apparente, provocata dall'effetto fotopositivo, ma di più risulta dall'esperienza che le λ, eccitanti il massimo effetto positivo, non eccitano mai, anche per tensioni elevate, l'effetto negativo, mentre le λ brevi, purchè fuori di quei massimi di eccitazione, provocano l'effetto negativo. Di più in uno stesso campione minerale vi sono zone di grande sensibilità positiva e zone di grande sensibilità negativa, ben distinte fra di loro (1). Anche nelle polveri cristalline compresse si ha (Gudden e Pohl) il verificarsi della conducibilità fotoelettrica (2).

7. - Fra le sostanze che presentano una fotoconducibilità molto marcata e che, per la loro resistenza propria non troppo elevata, hanno dato luogo ad alcune applicazioni pratiche, ricorderemo principalmente: il Selenio, l'Antimonite e il Cu_2O. Per tutte e tre queste sostanze l'effetto fotoelettrico, ossia il cambiamento percentuale di resistenza in seguito alla irradiazione, è proporzionale alla radice quadrata dell'energia assorbita; il massimo di questo effetto corrisponde a $\lambda = 700\,\mu\mu$ per il Selenio (Pfund, Pochettino), a $\lambda = 698\,\mu\mu$ per l'Antimonite (Jaeger); e a $\lambda = 280\,\mu\mu$ per il Cu_2O (Pfund). L'effettto sussiste anche a temperature prossime a quella di ebollizione dell'aria liquida e, per tutte e tre le sostanze, il suo massimo si sposta a —190°C. verso le λ più brevi; uno spostamento in senso contrario si verifica sempre in corrispondenza ad un'elevazione di temperatura. Notevole è il fatto che nei cristalli di Antimonite la sensibilità è la stessa nelle tre direzioni principali del cristallo e che nessuna differenza si nota, se si irradia con luce polarizzata rettilineamente, al variare degli angoli fra il piano di polarizzazione di quella e gli assi del cristallo. Nel Cu_2O, la cui conducibilità viene ritenuta (Pfund) elettronica e nel Selenio si riscontra che qualora si illumini solo parzialmente il preparato, la conducibilità fotoelettrica non è limitata alla porzione illuminata, ma si riscontra anche nelle regioni vicine tenute al buio, come se quello stato speciale di conducibilità aumentata si fosse propagata da quella a queste.

Per quanto riguarda il Selenio si potrebbe dubitare che la massima parte dei risultati sperimentali fin qui ottenuti non avessero che un valore pratico in vista delle applicazioni tecniche, dato che vennero riscontrate nelle cosidette cellule al Selenio, nelle quali questo metalloide trovasi in uno stato di aggregazione molto particolare. Però molti di quei risultati sono stati recentemente verificati anche nei cristalli di Selenio isolati e quindi le particolarità strane di questa sostanza nel suo comportamento elettrico, sia al buio che alla luce, sono da ritenersi non dovute allo stato speciale in cui trovasi in dette cellule, causa il trattamento subito nella preparazione di queste, ma caratteristiche dell'elemento che viene così ad essere un conduttore variabile tipico. Infatti la fotoconducibilità si riscontra (Dieterich) tanto nei cristalli aciculari che nei lamellari e se si illumina una porzione di un cristallo, l'azione fotoelettrica si propaga al resto (Brown) con una velocità di 2 $\frac{cm}{sec}$; la conducibilità di tutte le varietà di Selenio sensibili alla luce, cresce, tanto al buio che alla luce, al crescere della temperatura (1) (Datta). Tanto alla luce che al buio la conducibilità cresce con il crescere della tensione applicata (Pochettino, Ries) e questa deviazione dalla legge di Ohm si verifica (Brown) solo nella porzione del preparato cui è applicata la tensione esterna e non si propaga al resto. L'effetto fotoelettrico non raggiunge il suo valore definitivo immediatamente all'illuminazione (Majorana), nè scompare istantaneamente alla soppressione dell'eccitazione; in ambedue i casi dunque le variazioni di resistenza si manifestano con una certa inerzia; questa è maggiore nel ritorno al buio (Ries, Pochettino, Glatzel), è tanto maggiore quanto minore è la tensione applicata (Späth), e cresce (Dowrell) al diminuire della temperatura; comportamento questo che ricorda quello dei cristalli cattivi conduttori, fotosensibili. La sensibilità alla luce è minore quanto maggiore è la conducibilità del preparato e quindi diminuisce, alle temperature ordinarie, al crescere della temperatura e della tensione applicata (Pochettino); come al crescere della pressione la resistenza diminuisce, diminuisce anche la sensibilità (Brown e Stebbins). Peculiare delle ordinarie cellule al Selenio è il fatto che se si fa passare per esse una corrente alternata di conveniente voltaggio, si ha (Kalischer, Pochettino e Trabacchi) un aumento di resistenza e di sensibilità (2).

Ma c'è nel comportamento elettrico del Selenio un'ulteriore particolarità che presenta, sembra, esso solo fra tutte le sostanze fotosensibili e che gli conferisce una posizione speciale anche fra i conduttori variabili: se si pone del Selenio grigio cristallino fra due elettrodi trasparenti di vetro platinato e lo si illumina attraverso uno di questi, si ha una forza elettromotrice, dovuta all'illuminazione, che si forma praticamente senza inerzia e può raggiungere fino 0,1 Volta; la superficie illuminata forma l'elettrodo positivo e quindi la corrente che si stabilisce se si uniscono metallicamente i due elettrodi va, nel

(1) È da notare che questi minerali studiati da Coblentz hanno per lo più struttura fibrosa e presentano spesso conducibilità unipolare che, ad una certa temperatura compresa fra -20°C e 85°C., cambia di segno: si osserva allora l'effetto fotonegativo quando la corrente va nel senso della minore resistenza al buio, mentre la distribuzione della sensibilità nello spettro e l'ordine di grandezza dell'effetto positivo sono gli stessi nei due sensi.

(2) Strano è però il fatto che i massimi di sensibilità nello spettro si riscontrano solo usando differenze di potenziale applicate rilevanti; con campi inferiori a 2000 Volta la conducibilità fotoelettrica cresce continuamente al diminuire della λ eccitante con un andamento che ricorda quello dell'effetto Hallwachs normale.

(1) Dopo un tempo sufficientemente lungo le cellule ordinarie al Selenio assumono una resistenza molto bassa che cresce col crescere della temperatura, e perdono quasi completamente la sensibilità alla luce (Pochettino).

(2) Anche i raggi X provocano una variazione di resistenza nel Selenio, ma con un'inerzia molto maggiore che non la luce ordinaria.

Digitized by Google

Selenio, nel senso dei raggi luminosi eccitanti (Hesehus) (1).

Recentemente lo Späth ha dimostrato che parallelamente alle variazioni di resistenza alla luce si ha nel Selenio una variazione della costante dielettrica, la quale si effettua anch'essa con una certa inerzia che è maggiore nell'oscuramento che non all'illuminazione ; però mentre la conducibilità viene, in alcuni casi, perfino decuplicata con l'illuminazione, la costante dielettrica cresce, nelle stesse condizioni, soltanto del 5 %

Numerosi sono i tentativi finora fatti per spiegare un comportamento così strano ; si deve però riconoscere che nessuno finora soddisfa completamente. Dati i risultati dell'analisi microscopica dei preparati fotosensibili di Selenio usati nella pratica, la teoria che appariva più verosimile era quella che presupponeva la coesistenza in essi di due modificazioni del Selenio a diversa conducibilità elettrica, trasformabili una nell'altra e formanti al buio un sistema in equilibrio ; la funzione della luce si ridurrebbe ad uno spostamento di questo equilibrio nel senso di un aumento della modificazione miglior conduttrice. I fenomeni di inerzia e di fatica si spiegano bene ammettendo che il Selenio meno conduttore sia più trasparente per la luce dell'altro e che quindi inizialmente la luce penetri di più, poi, formandosi maggior quantità di Selenio più conduttore l'assorbimento degli strati superficiali cresce e gli strati inferiori vengono ad essere eccitati in grado minore con che in essi si riforma del Selenio meno conduttore. Ma il fatto che anche nei cristalli di Selenio rosso si abbia l'effetto fotoelettrico (sebbene in grado molto minore) rende perplessi nell'accettare senza ulteriori chiarimenti questa teoria dell'equilibrio che del resto lascia sempre impregiudicata la questione del tipo di conducibilità da assegnarsi al Selenio al buio, il quale costituisce veramente il prototipo dei conduttori variabili.

8. - Non si può chiudere questo breve cenno su i conduttori variabili senza accennare ad alcune particolarità che si manifestano nella conducibilità elettrica, finora ritenuta del tipo prettamente metallico, di certe leghe metalliche allo stato liquido. Il passaggio della corrente continua attraverso queste leghe, qualora avvenga con una densità di corrente superiore ad un certo limite, è accompagnata da trasporto di massa ; con ciò non si può naturalmente concludere che la loro conducibiità sia del tipo elettrolitico perchè se è vero che l'assenza di trasporto visibile di massa per opera della corrente elettrica non può autorizzare ad escludere la conducibilità elettrolitica, il verificarsi di quello non impone di classificare il conduttore, in cui si constata, fra gli elettroliti e ciò tanto più in questo caso perchè il trasporto di massa nelle leghe fuse non avviene secondo la legge di Faraday, ma in misura di gran lunga inferiore a quella ad essa corrispondente, e dipende inoltre dalla composizione percentuale della lega stessa.

Fin dal 1861 Gerardin aveva mostrato che, dopo il passaggio della corrente continua in una lega fusa : *Sn-Pb*, questa, dopo solidificata, era fragile, dura all'anodo, molle e malleabile al catodo e che l'amalgama di Sodio, dopo il passaggio della corrente, diveniva più ricca di Sodio al catodo che non all'anodo. Nel 1915 Levvis, Adams e Lanmann trovarono ancora che nelle amalgame di Sodio o di Potassio, nel passaggio della corrente, il metallo alcalino migra nella direzione della corrente, ma la quantità del metallo trasportato è molto inferiore a quella che sarebbe da aspettarsi dalla legge di Faraday ; questi risultati vennero confermati successivamente dalla Mayr. Recentemente il Kreemann e i suoi collaboratori hanno studiato il comportamento di numerosissime leghe rispetto al passaggio della corrente elettrica e sembra risultare dalle loro ricerche che, se è possibile raggiungere la densità di corrente sufficiente, tutte le leghe subiscono questo fenomeno del trasporto di un componente verso un elettrodo. Il senso della migrazione dei vari componenti le differenti leghe studiate è riassunto nella seguente serie :

$$Bi \longrightarrow Sb \longrightarrow Hg \longrightarrow Pb \longrightarrow Sn \longrightarrow Zn \longrightarrow Cd \longrightarrow Cu \longrightarrow Ag \longrightarrow Al \longrightarrow Na \longrightarrow K \ldots \text{ catodo,}$$

nel senso che il metallo corrispondente ad un determinato posto migra verso il catodo se trovasi a formare una lega con un metallo che occupi un posto precedente.

Nelle leghe solide, secondo Kreemann, non si verifica alcun trasporto di materia, secondo invece la Mayr questo si avrebbe ancora sebbene in grado molto minore che non nello stato liquido.

Anche di questi fenomeni manca una teoria veramente plausibile.

9. - Quanto si è esposto fin qui deve indurci a confessare che, malgrado il copioso materiale sperimentale raccolto da Volta in poi, i punti oscuri sull'ultimo meccanismo della conducibilità elettrica sono ancora molto numerosi. Abbiamo visto come si abbia tutta una serie di tipi di conduttori che presentano modalità di comportamento variabili dall'elettronico all'elettrolitico : così dai conduttori nettamente metallici, seguenti la legge di Wiedemann e Franz, nei quali la conducibilità è dovuta ad elettroni liberi esistenti in numero indipendente dalla temperatura, si passa ai conduttori ancora elettronici, nei quali però la concentrazione in elettroni liberi varia con la temperatura, e il cui comportamento è bene rappresentato dalla formola di Koenigsberger; segue infine un terzo tipo di conduttori elettronici per cui occorre modificare questa formola ammettendo una dipendenza del calore di ionizzazione Q dalla temperatura T. Per altri conduttori la conduci-

(1) Se si forma un elemento con un elettrodo di Selenio grigio cristallino e uno di Platino o di altro metallo in una soluzione di acido solforico al 3 % si ha, al buio, una f.e.m. debolissima il cui segno dipende dal metallo, ma se si illumina il Selenio (Sabine, Reinganum) questo diventa fortemente elettronegativo qualunque sia il suo segno quando trovasi al buio.

Digitized by Google

bilità non può più riguardarsi come affidata ad elettroni liberi, i vettori dell'elettricità divengono ioni senza che ancora si manifesti il vero carattere tipico della conduzione elettrolitica ossia il verificarsi della legge di Faraday; questi ioni, dei quali può essere mobile anche uno solo, non fuoriescono dal conduttore, non si scaricano agli elettrodi e formano delle cariche spaziali in vicinanza di questi. Finalmente si ha la grande classe dei conduttori elettrolitici veri per i quali, siano le mobilità di ambedue gli ioni dello stesso ordine di grandezza o siano talmente differenti una dall'altra da potersi praticamente considerare uno ione come fisso e l'altro come mobile, si verifica sempre la legge di Faraday. A complicare ancora le cose si hanno, come vedemmo, casi in cui le due conducibilità: elettronica ed elettrolitica, o coesistono contemporaneamente nello stesso conduttore, o questo presenta l'uno o l'altro tipo di conducibilità a seconda della temperatura.

Esclusi i due casi estremi, sono da considerarsi come variabili tutti gli altri tipi intermedi di conduttori? Finora tali sono stati considerati dai vari autori sebbene le ipotesi fatte su la natura della loro conduzione non differiscano sostanzialmente da quelle corrispondenti ai due tipi fondamentali: l'elettronico o lo ionico. Secondo me esiste però un gruppo di conduttori che veramente possono dirsi variabili, ed è costituito da quelli presentanti questi due caratteri tipici che li differenziano da tutti gli altri: *a*) non seguire la legge di Ohm nel senso che la loro conducibilità cresce al crescere della tensione applicata; *b*) presentare un accrescimento di conducibilità susseguente nei primi istanti di applicazione della corrente. Come avviene la propagazione dell'elettricità in questi conduttori tipicamente variabili? Si deve attribuire il loro comportamento ad un'azione ionizzante della corrente su di essi? Presentano essi altri caratteri comuni che permettano di riferire le loro proprietà elettriche ad altre proprietà fisiche? Non si può rispondere a queste domande; il materiale raccolto è ancora troppo scarso e nessuna ipotesi, per spiegare questo comportamento, è stata avanzata la quale abbia almeno il vantaggio di poter servire da ciò che si chiama: ipotesi di lavoro.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. LUIGI PUCCIANTI
ISTITUTO DI FISICA R. UNIVERSITÀ DI PISA

LA TEORIA DEL MAGNETISMO

Digitized by Google

Digitized by Google

La teoria del magnetismo è fra le varie teorie dei fenomeni fisici quella che ha preso durante lo sviluppo della scienza i più svariati atteggiamenti. In parte ciò è dovuto all'antichità dell'argomento, in parte all'intima connessione con la teoria dell'elettricità, connessione la quale è stata posta, ora come analogia con l'elettrostatica, ora come riduzione all'elettrodinamica. Questo ultimo concetto ha definitivamente prevalso, solo dopo un lungo e faticoso travaglio, il quale accompagna il grande sviluppo teorico della elettrologia, la formazione della teoria elettromagnetica della luce, e il grande svolgersi e determinarsi di quella teoria matematica, che per eccellenza è Fisica-Matematica, la teoria dei campi vettoriali.

Oltre a ciò, ma in conseguenza di ciò, la molteplicità delle vedute teoriche sul magnetismo viene in certo modo a raddoppiarsi, perchè esse si scindono nella teoria del campo magnetico e nella teoria delle proprietà magnetiche dei corpi, scissione, se si vuole, fittizia e quindi, si può dire, in ultima analisi assurda, ma pure notevole nella storia delle teorie magnetiche.

La teoria delle proprietà magnetiche dei corpi è d'altra parte inscindibile dalla teoria generale della loro costituzione, cosicchè anche le relazioni fra i fenomeni magnetici ed elettrici si presentano con due apparenze o due gradi diversi, i quali si concretano rispettivamente in quei fatti che s'inquadrano senz'altro nella teoria del campo elettromagnetico, o meglio elettrodinamico, cioè i fenomeni elettromagnetici di prima specie, ed in quei fatti che non vi s'inquadrano se non mediante le teorie elettriche della costituzione dei corpi, cioè i fenomeni elettromagnetici di seconda specie (1); i quali sono alla lor volta inscindibili da importanti fenomeni termici: cosicchè in conclusione tutti i problemi concernenti il magnetismo non sono che particolari aspetti di tutti i problemi generali della Fisica teorica.

Ed anche nel campo sperimentale non v'è forse fatto fisico, del quale non si sia ricercata una relazione col magnetismo: dagli effetti di sforzi meccanici e della temperatura, e fenomeni reciproci (Matteucci, Wiedemann ecc.), agli effetti magneto-ottici, (Faraday, Kerr, Majorana, ecc.) i quali ultimi nel campo teorico suggerirono a P. Langevin la geniale identificazione del fenomeno di Zeemann col diamagnetismo fondamentale dei corpi.

Lo spazio assegnato a questo scritto non è sufficiente nemmeno ad una trattazione sommaria di questi argomenti, cosicchè io cercherò di illustrare in modo esauriente un sol punto, che già da tempo mi è sembrato di centrale importanza; e del resto, e non di tutto, mi limiterò a brevi cenni.

Il punto prescelto è la relazione tra le proprietà geometriche del campo e la natura intrinseca del fatto magnetico; che implica la critica del concetto di equivalenza tra correnti e magneti, la revisione del significato teorico delle tre specie di vettori magnetici comunemente indicati con B, H, I, lo svalutamento dell'analogia tra campo magnetico e campo elettrostatico, la identificazione del campo magnetico con quello elettrodinamico, la interpretazione nel suo vero valore e nei suoi giusti limiti della *dualità* fra campo elettrico e magnetico, quale risulta dalle equazioni di Maxwell. Ma ciò è in relazione anche con la critica dell'etere come mezzo fisico, cioè dell'etere corporeo o similcorporeo e quindi in armonia con la concezione einsteiniana della *prima relatività*.

In termini precisi mostrerò dunque come, mentre il campo elettrostatico è, e sempre si è ritenuto un campo newtoniano, il campo magnetico si è voluto artificialmente considerare come tale, immaginando un agente newtoniano del tutto fittizio, il *magnetismo libero*, mentre esso è in realtà un campo circuitale; ciò che torna a dire, che il vero campo magnetico è quello del vettore B, mentre il vettore H, altro non è se non un vettore ausiliario, cioè uno dei termini in cui B si può scindere per comodità di calcolo.

* * *

Un sommario richiamo storico è necessario per chiarir bene in che cosa consista il contrasto.

Al principio del secolo scorso erano note le due identiche leggi di Coulomb per le azioni tra cariche elettriche e tra poli magnetici. Queste costituivano la prima base della analogia tra campo elettrostatico e campo magnetico. Però erano note pure le esperienze elementari sui magneti, specialmente quella della calamita spezzata, le quali, a chi non dimentichi che le formule e le leggi matematiche non esauriscono la conoscenza della realtà, mostrano la differenza profonda fra magnetismo ed elettricità.

(1) Effetti Hall, Corbino, ecc.

Digitized by Google

Entrambe le leggi sono newtoniane, ma mentre le cariche elettriche, separabili, comunicabili, partibili, mobili sui conduttori, si possono considerare come reali masse agenti, i poli del magnete non separabili tra loro, non sono che poli, cioè estremi differenziati come gli estremi dell'asse di un corpo rotante.

Le esperienze di Oersted, la legge di Biot e Savart, quella di Laplace, posero le basi dell'elettromagnetismo, cioè aprirono la strada diritta non della analogia formale, ma della relazione intrinseca tra i fenomeni elettrici e magnetici. Poco dopo un passo gigantesco, quello anzi che avrebbe dovuto essere risolutivo, fu fatto da A. M. Ampère, il quale, scoperte le azioni elettrodinamiche, mostrò come ad esse si potevano senz'altro ridurre quelle magnetiche, e già nel 1820 affermò che un magnete altro non è se non un corpo in cui circolano concordemente correnti elettriche. Egli nella sua mirabile « Téorie des actions éléctrodynamiques deduite uniquement de l'expérience » dette poi la legge elementare delle azioni elettrodinamiche alla quale tutto l'elettromagnetismo e la magnetostatica poteva ridursi. Così i quattro capitoli: elettrostatica, magnetostatica, elettromagnetismo, elettrodinamica, erano già dal loro inizio virtualmente ridotti a due: elettrostatica ed elettrodinamica; come due sono i capitoli della Meccanica e della Chimica Generale.

Ma questa linea diritta e sicuramente tracciata non fu allora seguita. È vero che l'ammirazione per Ampère è stata sempre grande, Maxwell giunse a chiamarlo il Newton della elettricità, ma forse a causa della difficoltà analitica che presentava la sua formula, le sue idee restarono in disparte.

Subito dopo Poisson faceva la sua celebre teoria del magnetismo, in cui si riprende l'analogia dalle leggi di Coulomb e si considera il fluido magnetico come agente newtoniano.

Ampére stesso, è vero, si professava newtoniano, ma nel senso solamente di ridurre gli effetti complessi a una legge elementare; ma Poisson è newtoniano anche formalmente, e tratta il magnetismo come se fosse esso un agente newtoniano, e il campo magnetico un campo di tipo newtoniano, cioè, diremo ora, lamellare e dotato di divergenza nei luoghi ove esistono le masse agenti.

Questa teoria descrive alla meraviglia il campo all'esterno dei magneti, entro ad essi lavora di pura fantasia, immaginandoli come aggregati di masse agenti fittizie. La proprietà caratteristica del magnetismo, vi è introdotta come un elemento estrinseco, con l'ipotesi slegata dal resto, che la somma algebrica delle masse sia nulla per ogni parte finita del corpo magnetico. Solo le molecole conducono il magnetismo, e così si tenta di spiegare le proprietà magnetiche del ferro ecc.

La teoria dei dielettrici di O. F. Mossotti, modellata sulla teoria di Poisson, è assai più vicina al vero di questa, perchè immagina nel dielettrico qualcosa di possibile e anzi molto prossimo a ciò che ora sappiamo vi avviene realmente.

Con queste due teorie parallele, l'analogia di Coulomb era ribadita; ma mentre la elettrostatica fa con Mossotti un passo avanti, la magnetica fa con Poisson un passo avanti e due indietro: la descrizione del campo esterno è perfetta, ma sulla costituzione del magnete si mette da parte il vero, si mette avanti l'errore.

W. Weber ebbe la felice idea di abbandonare la conduttività magnetica delle molecole, e quanto al diamagnetismo fu esplicitamente ampèriano, e Maxwell pure in più luoghi del suo « Trattato » mostra di considerare il magnetismo come moto e l'energia magnetica come cinetica; ma la sua rappresentazione matematica complessiva, quella che sbocca nella teoria elettromagnetica della luce, è in forma statica. Precisando le idee di Faraday, egli crede fermamente all'etere, e considera azioni elettriche e magnetiche come stati di tensione del mezzo, sebbene per il campo magnetico tenda poi a scambiare questo stato di tensione con una forma di moto. Che il Maxwell non sia nel suo trattato perfettamente coerente è stato detto e ridetto; anzi dico io: questo magnifico difetto, che gli permette di prospettare le teorie sotto vari aspetti, dà alla sua opera una impronta di movimento e di vita, la quale la rende cento volte più attraente e istruttiva di quelle fredde trattazioni che non fanno una grinza.

Due concetti giusti si fanno dunque avanti dopo Poisson per merito del Weber: l'ipotesi dei magneti elementari preesistenti alla magnetizzazione e orientabili, i quali possono benissimo pensarsi come circuiti di Ampère; e l'interpretazione del diamagnetismo come prodotto da correnti indotte in circuiti senza resistenza.

La prima ipotesi fu sfruttata elegantemente dall'Eweing che mediante le azioni mutue trovò la chiave per interpetrare, almeno in linea generale, i fatti del ferromagnetismo, e si continuò nelle teorie più moderne.

La seconda pare quasi una profezia di una bellissima esperienza fatta tanto tempo dopo da H. Kammerling Onnes con un circuito superconduttore:

Un'elica di filo di piombo è chiusa su se stessa ed è raffreddata con l'elio liquido: cosicchè la sua resistenza elettrica si annulli.

Abolendo un campo magnetico in cui essa era immersa, la corrente in essa indotta persiste a lungo, in modo che essa equivale ad un magnete, è un magnete; ma che sia tale solo per effetto della corrente, si può mostrare rompendo il filo di piombo fra due punti di una derivazione nella quale è inserito un galvanometro, che mostra e insieme estingue la corrente stessa.

La polarità magnetica dell'elica è concorde al campo annullato, e sarebbe quindi opposta a un campo stabilito, cioè ha segno diamagnetico.

La somiglianza col magnete di Ampère è evidente, ma più propriamente questa esperienza realizza il diamagnetismo come lo concepiva Weber.

Ma tra gli epigoni di Maxwell il concetto ampèriano si offusca vieppiù, perchè l'analogia tra magnetica ed elettrostatica viene in prima linea, e la relazione tra i fatti elettrodinamici e quelli magnetici non si pensa come riduzione di questi a quelli, ma come *equivalenza*. Inoltre questa equivalenza generalmente si pone in termini tali che, se fossero giusti,

Digitized by Google

non potrebbero implicare, anzi escluderebbero una vera identità; perchè la condizione di equivalenza non è ritenuta indipendente dal mezzo ambiente.

A questo punto debbo avvertire che la grande molteplicità dei libri non permette di considerarli separatamente, e d'altra parte vi sono molte divergenze non solo di nomenclatura, e molti scrittori non portano in fondo le considerazioni circa l'influenza del mezzo ambiente, di modo chè restano talora dissimulate le difficoltà che ne derivano.

Cosicchè io sono costretto a riferirmi a una teoria quasi impersonale, la quale sebbene già superata dalla ricerca scientifica è ancora la base dell'insegnamento elettrotecnico. Questa teoria è essenzialmente teoria del campo magnetico, e le proprietà magnetiche dei corpi vi sono rappresentate da coefficienti determinati caso per caso con l'esperienza.

Non nego che questo ultimo punto di vista sia confacevole all'elettrotecnica, ma non si potrebbe nemmeno negare che tale teoria, sebbene in generale inquadri leggi vere, non ha mai raggiunto una soddisfacente chiarezza concettuale, come provano del resto le divergenze tra i trattatisti accennate sopra.

* * *

Il concetto fondamentale di questa che può dirsi la teoria comune del magnetismo, è quello, in origine faradiano e maxwelliano, delle forze trasmesse mediante modificazioni del mezzo, e ciò si concreta matematicamente nelle geometria dei tre vettori indicati concordemente con H, B e I e chiamati comunemente *forza magnetica, induzione magnetica e magnetizzazione*. I primi due si fanno corrispondere alla forza elettrica e all'induzione elettrica dell'elettrostatica; alla elettricità libera degli isolanti non carichi ma polarizzati, si fa corrispondere il *magnetismo libero*, trattato ancora come agente newtoniano, mentre all'elettricità vera (la carica elettrica) corrisponderebbe il *magnetismo vero*, il quale generalmente si afferma però esser sempre nullo. Infatti il magnetismo libero corrisponde alle divergenze (per lo più superficiali) di H e di I, mentre il magnetismo vero corrisponderebbe a quella del vettore B, che in generale è ritenuto solenoidale.

La teoria ha poi due gradi: la vera e propria magnetostatica (teoria dei magneti permanenti) e la trattazione del magnetismo temporaneo, che in conclusione non è che l'elettromagnetismo. La magnetostatica è chiara finchè tratta il campo fuori del magnete, ma nell'interno di questo si trova in gravi difficoltà, anzi nella intrinseca impossibilità di seguire il campo, che non può essere oggetto di osservazione diretta, e quindi ricorre ad artifiziosi ripieghi. Questi consistono nell'immaginare una cavità scavata nella massa del magnete, e nel calcolare il campo interno nei due casi limiti che per la cavità stessa svaniscano le dimensioni lineari perpendicolari o parallele alla magnetizzazione. Il primo caso permette di stabilire, o meglio dà l'illusione di stabilire, anche nell'interno della massa magnetica, il valore del vettore H, l'altro permette di calcolare il vettore B, ma come ente fittizio senza mostrarne la vera natura fisica. Cosicchè par quasi una fortunata combinazione che si giunga infine a stabilire una proposizione giusta espressa dalla relazione:

$$B = H + 4\pi I,$$

la quale però vale a tutto rigore se il mezzo ambiente è quello in cui si sono definite le unità. In generale essa dovrebbe scriversi per il mezzo di induttività μ'

$$B = \mu' H + 4\pi I.$$

Ma l'introduzione di questo coefficiente μ' ci porta fuori della pura magnetostatica, perchè esso si fonda sullo studio combinato della magnetizzazione indotta e dell'induzione elettrodinamica, come mostrano le sue denominazioni di *permeabilità* e di *induttività*, le quali si riferiscono rispettivamente all'esperienze che mostrano la trasmissione di azioni magnetiche traverso a lunghe sbarre di ferro, e alle esperienze di induzione con eliche armate di ferro. La concordanza appunto tra le misure magnetometriche e le misure balistiche, fatte su lunghi fili di ferro introdotti in solenoidi elettrici, stabilisce traverso alla relazione precedente e a quella

$$B = \mu H$$

la relazione tra induttività μ e suscettività $\varkappa$

$$\mu = 1 + 4\pi\varkappa$$

nel mezzo unitario, e

$$\mu = \mu' + 4\pi\varkappa$$

in generale, cioè nel mezzo di induttività μ'.

Per giustificare ciò bisogna ammettere che la corrente circolante nell'elica magnetizzante definisca il valore di H, mentre gli effetti di induzione siano dati dal flusso di B.

La causa di queste distorisioni logiche sta in ciò che il vero carattere del vettore B è quello che si manifesta nelle esperienze di induzione elettrodinamica; esso costituisce un campo in ogni caso solenoidale con linee di flusso rientranti, e le correnti indotte che si producono al suo stabilirsi e al suo estinguersi dànno il modo di determinarlo, il solo modo veramente logico, per mezzo delle variazioni del suo flusso e della legge di Neumann. In tale vettore si sommano gli effetti locali del corpo magnetizzato con quelli esterni che costituiscono l'azione magnetizzante quale è rappresentata dal vettore H, cui si dà anche la denominazione di forza magnetizzante, che è assai più giusta di quella di forza magnetica. Insomma il corpo magnetizzabile aggiunge un suo contributo locale all'azione magnetizzante (per esempio fornita dalla corrente elettrica circolante nell'elica), e ciò spiega naturalmente il rinforzo delle azioni induttive fornito dai nuclei di ferro. Certo vi sono anche mezzi fluidi nei quali μ è sensibilmente diverso dall'unità, nel caso più comune è $\mu > 1$ e le azioni fra aghi magnetici risultano in essi indebolite,

Digitized by Google

il che permette, in questo caso, una chiara distinzione quantitativa tra i valori di B e quelli di H. Ma nella teoria comune invece di spiegare la vera ragione di ciò, la quale consiste nella, sia pur debole, magnetizzazione del mezzo e nelle forze che su di esso si esercitano, pare che si attribuisca ciò a una differenza qualitativa nella natura dei due vettori.

In altri termini nella teoria comune del magnetismo ci si guarda bene da pensare che la presenza di una sostanza magnetica non faccia che rafforzare il campo; anzi si distingue l'induzione magnetica dalla forza magnetica anche come specie di grandezza, e coloro che più cercano di essere rigorosi, persuasi fino alla convinzione assoluta del concetto delle forze trasmesse e delle modificazioni del mezzo, considerano i due vettori come eterogenei e ritengono che l'induttività non sia un coefficiente numerico, ma una grandezza fisica pertinente a ciascun mezzo non escluso il vuoto (che si chiama etere libero), della quale grandezza si adotta però una misura puramente relativa al mezzo campione, e arrivano quindi a trasportarsi dietro il μ anche nelle espressioni dimensionali.

Tutto ciò porta alle leggi sulla dipendenza delle azioni dal mezzo, le quali dicono le azioni mutue magnetiche avere intensità inversamente proporzionale alla induttività del mezzo, le elettromagnetiche da essa indipendente, le elettrodinamiche ad essa direttamente proporzionale.

Queste leggi sono giuste nelle condizioni geometriche opportune, ma bisogna star bene attenti nell'applicarle, perchè, se no, avviene, come è avvenuto generalmente, che esse portino in errore, facendo credere che un sistema di correnti equivalenti a un magnete in un certo mezzo non lo sia più in un altro; il che toglierebbe la possibilità di pensare che *veramente* un magnete consista in un sistema di correnti.

L'errore culmina nella condizione di equivalenza tra lamina magnetica di potenza $\mathcal{P}$ e corrente di intensità i: formulata come di solito:

$$\mathcal{P} = i\,\mu$$

Chi scrive ricorda di aver dovuto molto meditare per liberarsi da questo errore tradizionale, e si compiace di esservi riuscito con una critica attenta di queste leggi fondamentali poste al confronto della realtà.

La lamina magnetica è un ente puramente fittizio. Le sole lamine magnetiche, che esistono nei laboratori di fisica, sono di cartone, nero perchè somigli alla lamiera di ferro, e portano sulle due faccie un N e un S segnati col gesso. Essendo dunque la lamina magnetica un ente fittizio, le si può attribuire tutte le proprietà che si vuole; essa ha, è vero, le sue benemerenze storiche (giovò al Maxwell adattandosi meglio di altro alle sue correnti chiuse), ma non è che un intermediario ipotetico, non approssimabile dalla realtà. La realtà si approssima invece all'altro tipo di semplice magnete: il solenoide. Orbene per i solenoidi lunghi e sottili magnetici ed elettrodinamici, le leggi enunciate sopra valgono, purchè sia trascurabile la grossezza del filo anche in rapporto al diametro delle spire, e il mezzo ambiente fluido, penetri liberamente dentro le spire stesse; infatti allora, a pari intensità di corrente, il flusso di B entrante per un estremo e uscente per l'altro è proporzionale all'induttività del mezzo, mentre per i poli di una sbarra magnetica, esce ed entra in qualunque mezzo un flusso di B uguale a quello che percorre l'interno della sbarra, cioè invariabile. Manca però la uguaglianza geometrica dei due oggetti, perchè il mezzo non penetra nell'acciaio del magnete. L'uguaglianza si ristabilisce con i solenoidi *ciechi*, cioè tappati agli estremi, in modo che il mezzo non penetri nell'interno; e allora il flusso di B è dentro, e quindi anche fuori, indipendente dal mezzo, e le azioni elettrodinamiche, elettromagnetiche e magnetiche seguono tutte la stessa legge: proporzionalità inversa all'induttività del mezzo. L'equivalenza è allora indipendente dal mezzo e può quindi considerarsi come identità intrinseca. È tolto così l'inciampo per il ritorno alla concezione di Ampère.

Nella quale teoria l'unica causa e l'unico organo sensibile e mezzo di misura per il campo magnetico è la corrente elettrica. Nel vuoto una data corrente circolante in un filo produce un determinato campo vettoriale H; nei vari mezzi corporei questo campo opera come campo magnetizzante, cioè coordina le correnti elettriche già prima in esso esistenti ma disordinate. Le correnti così ordinate costituiscono le correnti di Ampère, le quali aggiungono al vettore H un altro vettore ad esso omogeneo $H_A = 4\pi I$ che in mezzi isotropici risulta opposto ad H (diamagnetismo) o concorde con H (paramagnetismo).

Il campo così modificato è quello del vettore

$$B = H + H_A$$

ossia

$$B = H + 4\pi I;$$

ponendo ancora

$$B = \mu H$$

ne risulta

$$\mu = 1 + 4\pi\varkappa.$$

Il concetto fondamentale è dunque semplicissimo. E nello svolgimento ulteriore non intervengono che le necessarie complicazioni geometriche, quando invece di un campo omogeneo si consideri un campo con parti eterogenee, cioè corpi con diverse proprietà magnetiche. In tal caso H in ciascun luogo rappresenta il contributo portato al campo totale da tutte le correnti (comprese quelle di Ampère) estranee a quel luogo, e $4\pi I$ il contributo delle sole correnti di Ampère locali.

L'energia magnetica, considerata come pura energia intrinseca e mutua di correnti elettriche, ha in tutto le solite espressioni, delle quali però è finalmente chiaro il significato. Così nel caso di un materiale isteretico essa si scinde al solito in una parte reversibile ed in una irreversibile (quella che si trasforma in calore durante un ciclo), ma la parte reversibile si mostra come la somma di due termini: l'energia intrinseca che avrebbe la corrente magnetizzante nel vuoto, l'energia mutua di essa e delle correnti di Ampère, il che è perfettamente logico e naturale.

Digitized by Google

I vantaggi dal punto di vista concettuale ed anche didattico di un ritorno alla teoria del magnetismo secondo Ampère non possono qui essere completamente esposti, ma sono, a mio avviso, assai notevoli.

Però bisogna tener presente che tale ritorno implica:

1° il negare qualunque proprietà magnetica al vuoto, perchè in esso non vi possono essere correnti di Ampère.

2° il considerare come unica fonte di azioni magnetiche la corrente elettrica, abbandonando il magnetismo libero che non è in ultima analisi se non l'immagine di ciò che non esiste, cioè del magnetismo vero. Anzi, invece di dire con Drude « non esiste il magnetismo vero », si dice sinceramente: « non è vero che esista il magnetismo » (ben inteso il magnetismo come agente newtoniano, perchè esiste il magnetismo solo come insieme dei fatti elettrodinamici delle calamite).

3° L'Abolire l'eterogeneità di B e di H e anche di I e il considerare, non per convenzione, ma per necessità μ e $\varkappa$ come numeri puri.

4° Il considerare H semplicemente come una parte di B, quella parte che non è data dalle correnti locali di Ampère, cioè come *forza magnetizzante*, mentre B è la *totale forza magnetica*, o anzi *elettrodinamica*.

Per una teoria vettoriale del campo non si fanno ipotesi speciali sulla natura delle correnti di Ampère, anzi ad esse si sostituiscono le correnti equivalenti (qui la parola equivalente ha un altro significato) supposte circolanti attorno ai tubi di flusso, la cui intensità per unità di lunghezza del tubo risulta eguale senz'altro all'intensità della magnetizzazione.

Certo si perde la stretta analogia con l'elettrostatica, ma ciò è necessario perchè l'energia magnetica si concepisce quale essa è, cioè come energia di moto.

D'altra parte resta la dualità tra il campo elettrico e il magnetico, nei limiti però in cui essa è vera cioè piena, vale a dire in un mezzo isolante scarico:

$$\operatorname{rot} H = \frac{1}{c}\frac{d\,kE}{dt} \qquad (1)$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c}\frac{d\,\mu H}{dt}$$

$$\operatorname{div} \mu H = O \qquad \operatorname{div} kE = O$$

ma si spiega perchè, essendo presenti conduttori o cariche, la simmetria delle formole si altera.

$$\operatorname{rot} H = \frac{1}{c}\frac{d\,kE}{dt} + 4\pi\lambda E + 4\pi v\rho$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c}\frac{d\,\mu H}{dt}$$

$$\operatorname{div} \mu H = O \qquad \operatorname{div} kE = 4\pi\rho$$

(1) E è il vettore forza elettrica, k l'induttività elettrica c la velocità critica.

senza pretendere che essa sia astrattamente piena anche in questo caso, e che (non si saprebbe per quale ragione) in *tutti* i corpi conosciuti sia nulla la corrispondente magnetica della conduttività elettrica λ e della densità elettrica ρ.

E si noti che dell'esser nulla la conduttività magnetica le teorie postmaxwelliane tanto bene tacciono la ragione, che P. Curie dubitò anche che ciò fosse proprio vero, e tentò un'esperienza per vedere se il nucleo di ferro di un trasformatore potesse essere sede, sotto l'azione di una corrente costante circolante nel primario, di una corrente magnetica capace di produrre una corrente continua nel secondario.

Invece nella teoria elettrodinamica s'inquadra naturalmente la differenza sostanziale fra i fatti magnetici ed elettrostatici, quale risulta dalla esperienza della calamita spezzata.

I campi appaiono nella loro vera natura: quello elettrostatico newtoniano, cioè lamellare e a divergenza, quello magnetico circuitale, cioè solenoidale e a rotazionale. Le variazioni nel tempo di questo aggiungono un termine circuitale al campo elettrostatico, termine che rappresenta il campo elettrico indotto.

Le equazioni, qualunque siano state le concezioni faradayane, attraverso le quali Maxwell vi giunse, sono da esse indipendenti, perchè esprimono vere leggi, cioè relazioni tra enti quantitativi determinabili con esperienze realizzabili. Esse valgono nel vuoto dove è $\mu = 1$ e $\varkappa = 1$, e non vi resta allora che l'unica c, costante universale; esse non hanno bisogno di un riferimento speciale, ma si trasformano in se stesse (pur variando il valore dei vettori) con la trasformazione di Lorentz. Le onde, che sono rappresentate da un loro integrale, si librano nello *spazio di qualsiasi riferimento* (1) *inerziale*, senza appoggiarsi a un mezzo corporeo o similcorporeo, di cui nessuno esperimento ha mai verificato l'esistenza.

* * *

Così abbiamo mostrato la confacevolezza della teoria ampèriana del campo magnetico con quella della relatività. Vediamo ora sommariamente come la teoria elettrodinamica, in forma di teoria delle proprietà magnetiche dei corpi, non solo abbia conseguito notevoli progressi per i suoi fini diretti, ma abbia condotto alla verificazione sperimentale della sua fondamentale ipotesi, e a relazioni con la teoria spettroscopica dei *quanta elementari di azione*.

I concetti ampèriani furono ripresi quasi un secolo dopo le opere di Ampère, quando le conoscenze sulla natura della corrente elettrica erano enormemente progredite, e ormai si riteneva generalmente e giustamente essa essere sempre di natura convettiva, cioè consistere nel moto ordinato di corpuscoli elettrici discreti. Di questi i negativi (cui generalmente si riserva il nome di *elettroni*) erano già indirettamente assai ben conosciuti, mentre dei positivi molto meno si sapeva e si sa. Però si pensava e si pensa che,

(1) Il Bezieungsraum di Einstein.

Digitized by Google

a causa della loro maggior massa, i loro movimenti abbiano minore importanza.

H. Lorentz aveva mutato leggermente nella forma ma profondamente nel concetto le equazioni maxwelliane, secondo il suo sistema dualistico: etere fisso, corpuscoli elettrici mobili. La presenza di questi spiega in linea generale, e quindi può surrogare nelle equazioni, non solo la conduttività e la induttività elettrica, ma anche la induttività magnetica, e ciò segna il ritorno deciso sebbene generico alla concezione elettrodinamica del magnetismo; ma in questo ordine di idee è implicita anche una profonda mutazione del concetto di etere, che non è più un mezzo similcorporeo, ma un mezzo *sui generis* distinto sostanzialmente dai corpi. Per questo e per l'uso della trasformazione di variabili, che, sebbene già da altri introdotta, prese il nome da Lorentz, si era con questa teoria alla porta della relatività, ma però fuori della porta.

Per quanto ci riguarda direttamente, diremo che nei primi anni di questo secolo, gli elementi magnetici dei corpi non si potevano ormai pensare se non consistenti in elettroni circolanti. E questo è appunto il concetto da cui parte P. Langevin, per il quale la corrente di Ampère è la traiettoria chiusa dell'elettrone. Essa costituisce un magnete di momento

$$\varepsilon \alpha \nu$$

(ε è la carica dell' elettrone in misura elettromagnetica, α l'area dell'orbita, e ν la frequenza della circolazione), il quale momento magnetico vien calcolato dal valore medio nel tempo, del campo in un punto relativamente lontano.

Osservo subito, per tornarvi in seguito, che a tale campo medio dovrebbe aggiungersi una radiazione, la quale qui non si considera.

L'effetto primo di un campo magnetico esterno, ossia di una forza magnetizzante, su un qualsiasi sistema di elettroni circolanti, è quello di modificarne il movimento in modo, che si produca un effetto *diamagnetico*, «diamagnetismo fondamentale» (e in ciò riconosciamo trasformato e progredito il concetto weberiano del diamagnetismo per induzione); e si produca anche una modificazione della radiazione (che ora invece si considera), cioè l'effetto Zeemann.

Ma se il sistema elettronico molecolare o atomico, presenta inizialmente una disimmetria tale da conferirgli un momento magnetico totale non nullo, ecco che esso tenderà a orientarsi in modo da produrre un effetto *paramagnetico* (e così si ritorna ai magneti elementari orientabili di Weber e di Eweing), il quale si sovrappone al diamagnetismo fondamentale. Ma anche di tale sovrapposizione la teoria Weber Eweing ci aveva dato un precedente, nella previsione (difficilmente verificabile dall'esperienza) che per forze magnetizzanti altissime la magnetizzazione di corpi ferromagnetici dovesse, dopo raggiunta la saturazione, diminuire di nuovo.

Un effetto simile, ma prodotto da un meccanismo intrinsicamente diverso, sarebbe quello del *metamagnetismo* di Gans.

Mancando lo spazio per tratteggiare, ed essendo impossibile riassumere brevemente le teorie di questi scienziati e di Weiss, mi limito a richiamare che quest'ultimo propugnò il concetto del vero atomo magnetico, di cui tutti i momenti magnetici elementari sono multipli interi, il *magnetone*.

Ma, questo concetto prende nuova forma e nuova sostanza con Bohr. Nella sua teoria la variazione saltuaria di momenti magnetici elementari consegue dal *quanteggiamento* azimutale delle orbite, ed entra in giuoco per mezzo dell'analisi quantica di esse secondo, non più un solo, ma due parametri angolari, che entrano in conto non appena un campo, per quanto poco intenso, abbia stabilito una direzione privilegiata.

Ed ecco che gli esperimenti di Gerlach e Sterne sceverano in uno sciame di atomi di argento i due gruppi di magnetoni orientati concordemente ed oppostamente al campo agente.

Della teoria di Bohr è quindi elemento fondamentale una relazione indissolubile tra momento magnetico e quantità di moto areale ovvero *momento meccanico*, la cui grandezza si esprime con un multiplo intero del *quantum* elementare di azione h; il che permette di quanteggiare anche il momento magnetico.

Ma tale relazione tra momento magnetico e meccanico, dalla quale doveva procedere la verificazione dei concetti amperiani, non è essa quantistatica, e per trovarne la prima radice dobbiamo risalire al Maxwell, il quale non solo pensò astrattamente che magnetizzazione fosse rotazione, ma anche tentò la verificazione sperimentale di un'azione giroscopica in un elettromagnete fatto rotare intorno ad un asse non parallelo al suo asse magnetico.

Non deve far meraviglia che questo fecondo concetto sia stato ripreso solo dopo il lungo periodo di offuscamento dell' idee ampèriane; e ciò avvenne nel 1914 per opera di Einstein, il quale dal più semplice modello di magnete elementare elettronico ricavò il valore del rapporto tra momento magnetico e momento meccanico, esprimendolo per il rapporto tra la carica e la massa elettronica. Per tal via si calcola il valore della *rotazione per magnetizzazione* di un qualsiasi corpo. Questo fenomeno deve consistere in ciò che variando o meglio invertendo la magnetizzazione di una sbarra cilindrica, essa deve acquistare per reazione una certa velocità angolare, come verificò De Haas. Reciprocamente facendo ruotare un cilindro di ferro questo si deve magnetizzare, come verificò Barnett (*magnetizzazione per rotazione*).

L'accordo qualitativo e di ordine di grandezza di queste esperienze con la teoria basta a provare definitivamente la verità dell'origine elettrodinamica del magnetismo. Dal punto di vista quantitativo esse forse potranno decidere fra i diversi valori dati per il rapporto tra i momenti magnetico e meccanico, quali risultano da varie particolari teorie elettroniche.

Siamo così giunti agli atteggiamenti più recenti della teoria del magnetismo, e non posso passare sotto silenzio una concezione recentissima di Ehren-

Digitized by Google

field e Goudsmith, secondo la quale al moto rivolutorio dell'elettrone intorno al nucleo si dovrebbe aggiungere un moto rotatorio dell'elettrone intorno a se stesso, aggiungendo così anche un nuovo momento magnetico e meccanico.

Ho osservato più sopra che nella teoria di Langevin si calcola il campo medio prodotto dall'elettrone circolante, e non si considera la radiazione, la quale discenderebbe come necessaria conseguenza dalle stesse leggi dell'elettrodinamica, ma sarebbe fonte di varii inconvenienti, mentre poi ci si ricorda di considerare la radiazione a proposito del fenomeno di Zeemann ; il che suggerisce al critico la domanda « ma dunque l'elettrone circolante radia o non radia ? » o ancora « quando si deve pensare che l'elettrone circolante possa, e quando che non possa radiare ? »

In conclusione ciò che è il fondamento ed insieme la difficoltà, il punto oscuro della teoria quantistica di Bohr, era già insito, se non visibile a tutta prima, nella teoria elettronica del magnetismo secondo Langevin ; e ciò stabilisce una certa parentela tra magnetica e quantistica, che viene manifesta in primo piano col magnetone di Bohr e colle esperienze di Gerlach. Tale relazione va messa insieme con quella or ora trattata tra magnetica e relatività, e ne risulta confermato ciò che ho detto in principio ; che cioè tutte le questioni teoriche generali di magnetica non sono, se non aspetti di tutte le questioni generali teoriche della Fisica.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. ENRICO FERMI

ISTITUTO FISICO R. UNIVERSITÀ DI ROMA

GLI EFFETTI ELETTRO E MAGNETOOTTICI E LE LORO INTERPRETAZIONI

Digitized by Google

Digitized by Google

Introduzione.

È accaduto molto spesso, nella storia delle scienze naturali, che i progressi di esse più importanti dal lato speculativo, fossero legati al fondersi insieme di due capitoli ritenuti dapprima sostanzialmente distinti. Così la teoria cinetica della materia, rappresentandoci il calore come una estrinsecazione dei moti meccanici delle molecole, permise di arrivare ad una comprensione profonda delle leggi della termodinamica, interpretata come meccanica di un numero di corpi tanto grande da obbedire a leggi statistiche. Così la scoperta della pila, mostrando per la prima volta una intima connessione tra i fenomeni elettrici e quelli chimici, fu il punto di partenza per lo studio della elettrochimica, tanto fecondo sia per la chimica pura che per la fisica della materia.

Un altro campo di confine tra due rami della fisica è quello della magneto-ottica e della elettrooottica, cioè lo studio degli effetti sopra la emissione e sopra la propagazione della luce che si osservano quando la sostanza luminosa od il corpo attraversato dalla luce si trovano in un campo elettrico o magnetico. Che la presenza di un campo elettrico o magnetico debba alterare i fenomeni luminosi appare oggi, con la guida delle attuali idee sopra la natura della luce e la struttura della materia, senz'altro comprensibile. È infatti ormai bene accertato che le ultime particelle costituenti la materia sono corpuscoli elettrizzati alcuni positivamente (nuclei e protoni) ed altri negativamente (elettroni). Sono questi corpuscoli che, con i loro movimenti, dànno origine alla emissione delle onde elettromagnetiche costituenti la luce e determinano il modo di propagarsi della luce stessa attraverso ai corpi. Ora la presenza di un campo esterno, elettrico o magnetico, esercitando delle forze sopra tali corpuscoli, viene ad alterarne i movimenti e conseguentemente essa altererà anche i fenomeni luminosi. È interessante osservare però che il primo fenomeno magnetoottico fu scoperto da Faraday nel 1845, cioè trenta anni prima che si affermasse la teoria elettromagnetica della luce e che incominciassero a formarsi idee concrete sopra la struttura elettrica della materia. Così che questi fenomeni costituirono forse uno dei primi impulsi a ricercare una intima connessione tra luce ed elettricità da una parte e tra elettricità e materia dall'altra, e ci dànno anche oggi uno dei più validi mezzi per lo studio della struttura dell'atomo e della molecola. Prima di passare ad uno studio sistematico dei fenomeni elettro e magnetoottici vogliamo dare uno sguardo d'insieme al loro sviluppo.

Le prime idee concrete sopra una possibile influenza del magnetismo sopra la propagazione della luce pare risalgano a Sir J. F. W. Herschel, il quale fece anche qualche esperienza per mettere in evidenza effetti di questo tipo, senza tuttavia riuscirvi. M. Faraday studiò a lungo la stessa questione e, dopo numerosi tentativi riuscì, nel 1845, a scoprire l'effetto che da lui ha preso il nome. Se si manda della luce polarizzata rettilineamente attraverso ad un corpo isotropo trasparente che sia situato in un campo magnetico, in modo che le linee di forza siano parallele alla direzione di propagazione della luce si osserva che il piano di polarizzazione della luce che ha attraversato il corpo è rotato attorno alla direzione di propagazione della luce, rispetto al piano di polarizzazione della luce incidente.

Un fenomeno che presenta una certa analogia con l'effetto Faraday fu scoperto, circa 30 anni dopo da Kerr il quale mostrò che lo stato di polarizzazione della luce viene alterato dalla riflessione sopra una superficie speculare di ferro intensamente magnetizzato (Effetto magnetoottico di Kerr). Nel frattempo incominciava a svilupparsi lo studio della spettroscopia, e sorse il problema di ricercare una eventuale influenza di un campo magnetico sopra le frequenze delle righe spettrali di un gas luminoso contenuto in esso. Nel 1896 Zeeman fece vedere che le righe spettrali emesse da un vapore luminoso in un campo magnetico si scindevano in un numero variabile di componenti la cui distanza andava crescendo col crescere del campo magnetico. Quasi contemporaneamente riuscì a Lorentz di svolgere una teoria che permise di interpretare le caratteristiche principali del fenomeno, ed ebbe particolare importanza in quanto condusse alla dimostrazione che la particelle elettrizzate ai cui movimenti è dovuta l'emissione della luce, sono quegli stessi elettroni che costituiscono i raggi catodici. Dopo la scoperta di Zeeman lo studio sperimentale e teorico degli effetti di Zeeman è stato proseguito fino ad oggi con grande alacrità e costituisce attualmente, a prescindere dalla sua importanza in sè, uno dei più potenti metodi di indagine spettroscopica.

Digitized by Google

Due anni dopo Macaluso e Corbino scoprivano un fenomeno che può considerarsi come l'anello congiunzione tra gli effetti Faraday e Zeeman, e consiste in una rotazione magnetiva straordinariamente intensa che si osserva nei vapori in vicinanza delle loro righe d'assorbimento.

Un ultimo tipo di fenomeno magnetoottico, la birifrangenza magnetica, fu infine scoperto da Cotton che fece vedere che un corpo isotropo, posto in un campo magnetico, diventa birifrangente, e si comporta come un cristallo uniassico con l'asse parallelo alla direzione del campo. Parallelamente a questi effetti magnetoottici abbiamo gli effetti elettroottici. Conviene però osservare che, date le differenti proprietà di simmetria dei campi elettrico e magnetico (simmetria polare per il campo elettrico e assiale per quello magnetico) non potremo attenderci un analogo elettrico del potere rotatorio magnetico. I fenomeni elettroottici si riducono perciò sostanzialmente a due tipi: Effetto elettroottico di Kerr, che è l'analogo elettrico della birifrangenza magnetica ed effetto Stark che è l'analogo dell'effetto Zeeman e consiste in una separazione in componenti delle righe spettrali emesse da una sostanza che si trovi immersa in un intenso campo elettrico.

Fondamenti teorici della magnetoottica.

L'effetto di un campo magnetico sopra i fenomeni luminosi deve ricondursi in ultima analisi all'azione delle forze che il campo magnetico esercita sopra le particelle elettrizzate contenute nella materia. Un campo magnetico H esercita sopra un corpuscolo elettrizzato di carica e che si muove con velocità V una forza espressa, con notazione vettoriale, da

$$(1) \qquad \frac{e}{c} V \wedge H$$

Esiste un semplice teorema, dovuto a Larmor, il quale permette di valutare in modo assai espressivo l'influenza esercitata da una forza del tipo (1) sopra il moto di un sistema di punti aventi tutti la stessa carica e e la stessa massa m e soggetti, oltre che alle mutue azioni Coulombiane, soltanto ad una forza centrale (A questo tipo appartengono in realtà buona parte dei sistemi atomici). Consideriamo un tale sistema in assenza di campo magnetico e riferiamone il movimento, invece che ad assi fissi, ad una terna di assi coll'origine nel centro delle forze centrali, rotante con velocità angolare ω attorno ad un asse passante per il centro medesimo. Il moto del sistema di punti rispetto agli assi rotanti potrà descriversi, come è noto, come un movimento rispetto ad assi fissi, purchè si considerino agenti sopra ogni punto oltre alle forze effettivamente ad esso applicate anche le forze centrifughe $m \omega^2 r$ (essendo r la distanza del punto dell'asse di rotazione), e le forze centrifughe composte (forze di Coriolis) che hanno per espressione

$$(2) \qquad 2 m V \wedge \omega$$

Se supponiamo la velocità angolare ω abbastanza piccola perchè se ne possano trascurare i quadrati, riconosciamo che si possono trascurare le forze centrifughe pure e considerare agenti sui punti del sistema, oltre alle forze effettive, soltanto le forze centrifughe composte (2). Confrontiamo ora il moto del sistema di punti senza campo magnetico col moto nel campo magnetico, e riferiamo il primo movimento ad assi rotanti con velocità angolare ω, il secondo ad assi fissi. Nel primo caso dovremo considerare agenti sopra i punti del sistema le forze centrifughe composte (2), nel secondo le forze elettromagnetiche (1).

Si riconosce però immediatamente che, ove si ponga

$$(3) \qquad \omega = \frac{e}{2 mc} H$$

le forze (1) e (2) vengono a coincidere, e vengono dunque a coincidere anche i due movimenti considerati. Abbiamo così il teorema di Larmor:

La perturbazione prodotta da un campo magnetico esterno sopra il moto di punti materiali, aventi tutti la stessa carica elettrica e e la stessa massa m e soggetti, oltre che alle mutue repulsioni, soltanto ad una forza centrale, consiste semplicemente in una rotazione uniforme di tutto il sistema attorno alla direzione del campo magnetico con la velocità angolare (3) (Rotazione di Larmor).

La frequenza corrispondente alla velocità angolare (3), cioè

$$(4) \qquad \nu_L = \frac{e H}{4 \pi mc}$$

si dice frequenza di Larmor.

Osserviamo ancora che un sistema contenente delle cariche elettriche in movimento verrà ad essere, per effetto di questo movimento, circondato da un campo magnetico, in modo che si comporterà come un piccolo magnete. Il suo momento μ, per il caso di sistemi ai quali è applicabile il teorema di Larmor, è legato da una relazione assai semplice alla quantità di moto areale p del sistema; si trova precisamente

$$(5) \qquad \mu = \frac{e p}{2 mc}$$

Il meccanismo dell'emissione.

La emissione della luce da parte di un corpo incandescente, o reso, con qualsiasi metodo, luminoso, dipende dal movimento dei corpuscoli elettrizzati contenuti nel corpo. Le idee sopra il meccanismo preciso della emissione sono tuttavia state soggette a successivi cambiamenti; in quanto che al primo sorgere della teoria elettronica della materia si pensava che nei corpi fossero contenuti dei corpuscoli elettrici trattenuti da forze elastiche in posizioni di equilibrio. Allontanando uno di questi corpuscoli dalla posizione di equilibrio esso descrive attorno ad essa delle oscillazioni isocrone ed irradia perciò nello spazio energia elettromagnetica con la frequenza di tali oscillazioni. In seguito questa teoria fu abbandonata e sostituita dalla teoria dell'atomo di Bohr; secondo questa un atomo è costituito da un nucleo elettricamente positivo nel quale è concentrata praticamente tutta la massa atomica e che quindi sta fermo (purchè naturalmente l'a-

Digitized by Google

tomo non abbia un movimento d'insieme), e da un certo numero di elettroni negativi (tutti eguali tra loro) che girano attorno ad esso ; in modo che l'atomo viene ad essere paragonabile ad un minuscolo sistema planetario, in cui il nucleo ha la funzione del sole e gli elettroni quella dei pianeti. Secondo Bohr gli elettroni descrivono delle orbite meccanicamente possibili ; però, tra tutti i moti meccanicamente possibili essi possono descrivere soltanto una successione discreta di moti (detti stati stazionari o quantici) ed il processo dell'emissione è legato, in modo incomprensibile dal punto di vista della elettrodinamica classica, al passaggio dell'atomo da uno stazionario ad un altro. La differenza delle energie dei due stati stazionari viene emessa normalmente dall'atomo sotto forma di radiazione, la cui frequenza si calcola dividendo tale differenza di energia per la costante universale h (costante di Planck).

Nonostante la grande differenza tra il meccanismo di Bohr per la irradiazione ed il meccanismo classico, molte caratteristiche sono comuni ai due; vale anzi in generale il così detto principio di corrispondenza di Bohr il quale afferma che, in prima approssimazione, l' irradiazione di un atomo dedotta dai principi quantistici coincide con la radiazione che il sistema emetterebbe secondo la elettrodinamica classica. Questo principio giustifica in parte il fatto che molte conclusioni dedotte considerando la luce come emessa da un oscillatore classico restano valide in modo assai generale. Questo avviene in particolare nel caso dell'effetto Zeeman in cui larga parte dei risultati della prima teoria fattane da Lorentz considerando la luce come emessa da un oscillatore armonico si ritrovano nella teoria fatta sulla base dell'atomo di Bohr.

Effetto Zeeman.

Per questa ragione, nella descrizione dell'effetto Zeeman ci riferiremo dapprima al modello semplicistico della teoria di Lorentz, indicando quali risultati della teoria rispondano all'esperienza e quali no. Consideriamo perciò il movimento di un corpuscolo elettrizzato di carica e e massa m, che sia attratto da una forza proporzionale alla distanza verso un punto fisso O (origine delle coordinate) e sia inoltre soggetto all'azione di un campo magnetico H che supponiamo nella direzione dell'asse delle z. Indichiamo con ν_0 la frequenza propria dell'oscillatore in assenza del campo H. L'effetto del campo, per il teorema di Larmor, consiste in una rotazione uniforme di tutto il sistema attorno all'asse delle z, avente la frequenza (4). Ora il moto dell'oscillatore imperturbato, può sempre decomporsi in tre moti oscillatorii, uno lineare parallelo all'asse z, e gli altri due circolari paralleli al piano xy, uno in senso positivo e l'altro in senso negativo. Per effetto della rotazione di Larmor il primo di questi moti resta evidentemente inalterato, mentre le frequenze dei due moti rotatori vengono modificate, poichè la frequenza di Larmor si somma alla frequenza propria per il moto circolare che avviene in senso positivo, mentre si sottrae per il moto che avviene in senso negativo. Cosicchè, per effetto del campo, il moto dell'oscillatore si decompone in tre moti.

a) Un moto lineare con frequenza ν_0, parallelo all'asse z.

b) un moto circolare con frequenza $\nu_0 + \nu_L$ parallelo al piano xy ed in senso positivo.

c) un moto circolare con frequenza $\nu_0 - \nu_L$ parallelo al piano xy ed in senso negativo.

Esaminiamo ora l'effetto ottico di questa decomposizione del movimento dell'oscillatore. Le cose vanno diversamente secondo la direzione dalla quale si osserva la luce emessa dall'oscillatore. I due casi più tipici si hanno per l'osservazione longitudinale, cioè parallela al campo magnetico e quindi all'asse delle z, e per l'osservazione trasversale cioè perpendicolare al campo magnetico.

Un osservatore situato sopra un punto molto lontano sopra l'asse z, non vedrà il movimento parallelo alla direzione di osservazione e percepirà soltanto i due movimenti circolari *b*) e *c*). La luce emessa longitudinalmente apparirà dunque, per effetto del campo magnetico, separata in due componenti polarizzate circolarmente nei versi opposti ed aventi le frequenze $\nu_0 + \nu_L$ e $\nu_0 - \nu_L$.

Invece un osservatore trasversale, situato p. e. sull'asse x, vedrà il moto *a*) in tutta grandezza mentre le proiezioni dei due moti oscillatori *b*) e *c*) gli si presenteranno come due moti oscillatori lineari, paralleli all'asse delle y. Cosicchè la luce emessa in direzione trasversale apparirà separata in tre componenti polarizzate rettilineamente, una parallelamente al campo (1), avente la frequenza ν_0 della riga imperturbata, e le altre due polarizzate perpendicolarmente al campo con le frequenze $\nu_0 + \nu_L$ e $\nu_0 - \nu_L$. Osservando la luce in direzione obliqua la componente *a*) appare sempre polarizzata rettilineamente e le componenti *b*) e *c*) appaiono invece polarizzate ellitticamente. Prima di passare ad un confronto di questa teoria con l'esperienza converrà che diamo una idea dell' ordine di grandezza del fenomeno. Ponendo nella (4) per e, m, c, i loro valori numerici per l' elettrone e ponendo $H = 50.000$ Gauss, cioè uno dei massimi campi magnetici raggiungibili, si trova $\nu_L = 7.10^{10}$; per luci di 5000 A si trova dunque uno spostamento delle componenti estreme dalla riga imperturbata di circa 0,58 A.

Si vede dunque che, anche disponendo di campi magnetici assai intensi, l'effetto previsto è sempre molto piccolo e richiede per la sua osservazione mezzi spettrali di potere risolutivo alquanto elevato e righe spettrali che non siano naturalmente espanse.

Le prime esperienze di Zeeman furono fatte esaminando per mezzo di un reticolo la luce emessa da una fiamma di sodio situata tra le espansioni polari di un potente elettromagnete. L'osservazione longitudinale si faceva attraverso ad un foro praticato nelle espansioni polari, e quella trasversale direttamente attraverso l' interferro. Il potere ri-

(1) Contrariamente all'uso più comune e conformemente ad una opportunissima usanza che va affermandosi in molti lavori recenti, chiamiamo piano di polarizzazione della luce quello in cui vibra il vettore elettrico, e non quello del vettore magnetico.

Digitized by Google

solutivo, nella disposizione originale di Zeeman, non era sufficiente per veder la riga spezzata in componenti. Zeeman potè soltanto osservare che la riga si allargava per effetto del campo, e che nel caso dell'osservazione longitudinale i suoi bordi erano polarizzati circolarmente nei due versi opposti, mentre, osservando trasversalmente il centro della riga appariva polarizzato parallelamente ed i bordi perpendicolarmente al campo magnetico. Già da questi primi risultati tuttavia Zeeman potè concludere che l'ordine di grandezza dell'allargamento e le caratteristiche generali qualitative del fenomeno erano in accordo con le previsioni della teoria di Lorentz, purchè si ammettesse che i corpuscoli elettrici oscillanti avessero carica negativa e massa qualche migliaio di volte più piccola delle masse degli atomi.

Effetti Zeeman normali ed anomali.

In seguito i mezzi sperimentali per lo studio dell'effetto Zeeman furono rapidamente perfezionati in modo da poter osservare una per una le componenti in cui si scinde una riga spettrale per effetto di un campo magnetico. Si constatò allora che alcune righe presentavano un effetto Zeeman perfettamente conforme alla teoria di Lorentz (Effetto Zeeman normale) altre invece presentavano una decomposizione in componenti assai più complicata che prese il nome generico di effetto Zeeman anomalo. In generale le righe semplici presentano l'effetto Zeeman normale mentre

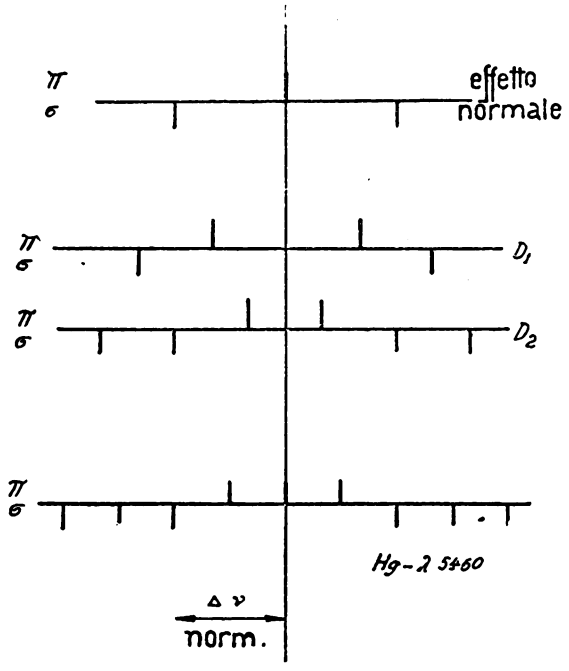


Fig. 1.

quelle che appartengono ad una molteplicità (doppietto, tripletto, ecc.) presentano l'effetto anomalo. Così p. e. le righe della serie di Balmer dell'idrogeno hanno l'effetto normale, mentre le righe D_1 e D_2 del sodio, che formano un doppietto, hanno un effetto anomalo; precisamente, osservando trasversalmente, la D_1 si spezza in 4 componenti, due parallele e due perpendicolari al campo, mentre la D_2 si spezza in 9 componenti due parallele e 4 perpendicolari al campo. Altre righe possono spezzarsi in un numero di componenti anche molto maggiore. Esempi di effetti Zeeman di vari tipi sono date dalla fig. 1.

Il modo di decomporsi di una riga spettrale nel campo magnetico, presenta un legame assai stretto con la serie spettrale a cui appartiene la riga. Questa circostanza, assai utile per la spettroscopia pratica, fu riconosciuta fin dai primi tempi della scoperta di Zeeman. Preston stabilì infatti la regola che righe appartenenti alla stessa serie spettrale presentano lo stesso tipo di effetto Zeeman; parimenti hanno lo stesso tipo Zeeman righe omologhe di elementi chimici differenti appartenenti alla stessa verticale del sistema periodico di Mendelejeff (Regola di Preston).

Si deve a Voigt una prima teoria degli effetti Zeeman anomali, basata sul calcolo della perturbazione magnetica di un sistema di due oscillatori. Tale teoria ha dato, per gli spettri di dubletti, dei risultati concordanti con l'esperienza per il caso delle righe *D* del sodio; ciononostante sappiamo ormai che tale concordanza deve ritenersi di natura piuttosto causale e che alla teoria di Voigt non si può attribuire altro che un valore fenomenologico.

Teoria quantistica dell'effetto Zeeman.

Per renderci conto delle idee che si hanno attualmente sopra l'interpretazione dell'effetto Zeeman normale ed anomalo, bisogna che ne cerchiamo la spiegazione nell'ambito delle teorie quantistiche e del modello atomico di Bohr-Rutherford.

La prima teoria quantistica dell'effetto Zeeman normale, dovuta a Debye, può brevemente descriversi come segue.

Consideriamo un atomo di Bohr in un campo magnetico H. Risulta dalle condizioni di Sommerfeld, che la quantità di moto areale degli elettroni attorno ad un asse parallelo al campo e passante per il nucleo, deve essere un multiplo intero di $h/2\pi$; essendo cioè s un numero intero (numero quantico magnetico), essa deve essere $sh/2\pi$.

D'altra parte abbiamo visto che tra quantità di moto areale e momento magnetico esiste la relazione di proporzionalità (5). Possiamo dunque concludere che la componente del momento magnetico dell'atomo parallela ad H è

$$(6) \qquad \mu = s \frac{e\,h}{4\,\pi\,mc}$$

essa risulta cioè eguale ad un multiplo intero della costante universale

$$(7) \qquad \frac{e\,h}{4\,\pi\,mc} = 0{,}91.10^{-20}$$

che si dice magnetone di Bohr. L'energia magnetica dell'atomo nel campo H sarà espressa da

$$(8) \qquad W_{\text{mag}} = \mu\,H = s\,H\,\frac{e\,h}{4\,\pi\,mc}$$

Consideriamo ora un salto quantico dell'atomo che conduca all'emissione di una riga, la cui fre-

Digitized by Google

quenza si calcola dividendo per h la differenza tra le energie dei due stati quantici iniziale e finale; se con s ed s^1 indichiamo i numeri quantici magnetici degli stati iniziale e finale, troveremo, nella differenza delle energie, un termine magnetico espresso da

$$\Delta W_{mag} = (s - s^1) H \frac{e h}{4 \pi mc}$$

e quindi alla frequenza ν_0 della riga in assenza di campo magnetico dovrà aggiungersi, per effetto del campo, il termine $\frac{\Delta W_{mag}}{h}$, essa diventerà cioè

$$(9) \qquad \nu_0 + (s - s^1) \frac{e H}{4 \pi mc}$$

Siccome poi, dal principio di selezione, si deduce che $(s\text{-}s^1)$ può prendere solo i valori 0, + 1, — 1 concludiamo che la nostra riga si spezzerà in tre componenti, aventi una la frequenza della riga imperturbata e le altre due la frequenza stessa cresciuta o diminuita della frequenza di Larmor (4). Questo risultato coincide con quello della teoria di Lorentz; anche lo stato di polarizzazione delle tre componenti, che può dedursi dal principio di corrispondenza, coincide con quello dato dalla teoria di Lorentz.

Il problema della interpretazione teorica dell'effetto Zeeman anomalo si presentò invece di risoluzione alquanto più difficile. Osserviamo infatti che, se si fa astrazione dalla struttura dell'elettrone, e lo si considera come un punto materiale, si può senz'altro applicare all'atomo di Bohr il teorema di Larmor e si è quindi condotti forzatamente all'effetto Zeeman normale. In un primo tempo furono fatte perciò, specialmente per opera di Landé ed Heisenberg, alcune ipotesi provvisorie che permisero, nonostante la loro ingiustificabilità, di raggiungere risultati importanti. Tali ipotesi consistono sostanzialmente nel distinguere l'atomo in due parti: l'elettrone luminoso, cioè l'elettrone più esterno dell'atomo al quale è dovuta la emissione della luce ed il nocciolo costituito da tutto il resto dell'atomo; e nell'ammettere che l'elettrone luminoso si comporti magneticamente in modo normale, mentre il nocciolo abbia una anomalia magnetica, inesplicabile nell'ambito della meccanica, consistente nel fatto che esso, per effetto di un campo magnetico, dovrebbe tendere a precedere con una velocità angolare doppia di quella voluta dal teorema di Larmor. Ammessa questa ipotesi si capisce come l'azione di un campo magnetico sopra tutto l'atomo consista, in prima approssimazione, nel farlo precedere con una frequenza intermedia tra quella normale di Larmor con cui tenderebbe a precedere l'elettrone luminoso e quella doppia della normale con cui tenderebbe a precedere il nocciolo. Così che l'atomo viene ad assumere una velocità di precessione diversa da quella normale, ciò che dà origine all'effetto Zeeman anomalo. Riuscì a Landé, in base a queste idee, di costruire una completa teoria degli effetti anomali; tale teoria permette di calcolare in modo completo l'effetto Zeeman di una riga, una volta che si sappia la posizione della riga nelle serie spettrali dell'atomo, e ciò anche nel caso delle molteplicità spettrali complicatissime che si trovano ad esempio negli spettri del ferro e del cromo. Nella teoria di Landé trova anche la sua espressione completa una regola, dedotta empiricamente da Runge, la quale afferma che la differenza tra le frequenze di una componente Zeeman e della riga imperturbata è sempre in rapporto razionale con la frequenza di Larmor.

Effetto Paschen-Back.

Inoltre può interpretarsi, per mezzo della teoria di Landé, un fenomeno, scoperto da Paschen e Back, consistente nel fatto che, mentre per campo magnetici deboli lo spostamento di ogni componente Zeeman dalla posizione della riga imperturbata è proporzionale al campo H, tale proporzionalità non si ha più con campi forti, e le varie componenti vanno spostandosi invece in modo tale che l'effetto Zeeman, per campi fortissimi finisce in ogni caso per diventare normale.

Per vedere come tale effetto possa spiegarsi con la teoria di Landé, osserviamo che, quando il campo magnetico diventa fortissimo, la differenza tra le azioni magnetiche sull'elettrone luminoso e sul nucleo diventa tale che ciascuno di questi due elementi si mette a precedere attorno al campo con la sua propria velocità di precessione (normale per l'elettrone e doppia della normale per il nocciolo). Siccome però l'emissione della luce è determinata dal moto dell'elettrone luminoso si capisce come l'effetto Zeeman debba venir determinato dal moto di processione di questo e diventi quindi normale per campi magnetici assai intensi.

L'elettrone rotante.

Ciò che resta assai insoddisfaciente nella teoria di Landé è la inesplicabilità della anomalia magnetica del nocciolo. Infatti, essendo anche il nocciolo costituito da elettroni soggetti alla forza centrale del nucleo, anche ad esso dovrebbe potersi applicare il teorema di Larmor, ed esso dovrebbe dunque comportarsi come magneticamente normale. La chiave per la risoluzione di questa contraddizione è da ricercarsi in una ipotesi recentemente proposta da Uhlenbeck e Goudsmit. Secondo questi autori si ammette che l' elettrone, oltre alla carica elettrica, abbia anche un momento magnetico della grandezza di un magnetone di Bohr (7). E che esso abbia inoltre, attorno al suo centro, un momento di quantità di moto di grandezza $h/4\pi$ con la direzione del momento magnetico. Siccome tutto questo potrebbe interpretarsi formalmente pensando l'elettrone come un corpuscolo carico di elettricità rotante attorno a sè stesso tale ipotesi è stata denominata ipotesi dell'elettrone rotante. Se pensiamo ora di porre un elettrone in un campo magnetico H, il campo eserciterà sul momento magnetico dell'elettrone una coppia meccanica. E siccome l'elettrone, avendo una quantità di moto areale, si comporta come un piccolo giroscopio, tale coppia avrà per effetto di imprimere all'asse dell'elettrone un moto di precessione attorno alla direzione del campo magnetico.

Fatti i calcoli, la velocità di precessione risulta doppia di quella (3) del teorema di Larmor per modo

Digitized by Google

che la teoria degli effetti Zeeman può svolgersi ora in perfetta analogia alla teoria di Landé, eliminando però la inesplicabile anomalia magnetica del nocciolo ed attribuendo invece la anomalia dell'effetto Zeeman alla struttura interna dell'elettrone.

L'ipotesi dell'elettrone rotante, oltre che degli effetti Zeeman anomali, permette anche di trovare spiegazioni del tutto naturali di numerosi altri punti della fisica atomica e della spettroscopia, che apparivano incomprensibili prima di essa; perciò, benchè ne manchino fino ad oggi conferme dirette, si ritiene generalmente che essa, almeno nelle sue linee generali, corrisponda alla realtà.

Esperienza di Stern e Gerlach.

Come si è visto la teoria dei quanti permette di spiegare in modo assai completo tutti i tipi di effetto Zeeman dai più semplici ai più complicati. Una conferma assai impressionante della realtà della spiegazione quantistica ci è fornita dalla esperienza di Stern e Gerlach, che ora vogliamo descrivere. Osserviamo perciò che, secondo la teoria quantistica, un atomo dotato di un momento magnetico, quando è posto in un campo magnetico si orienta rispetto a questo in modo che la componente del momento parallela al campo può prendere soltanto certi valori discreti i quali, nel caso degli effetti Zeeman normali, differiscono tra di loro di un magnetone di Bohr (cfr. formula (6)), in altri casi di quantità in rapporto razionale semplice col magnetone di Bohr.

Stern e Gerlach sono riusciti a verificare assai direttamente questa conseguenza della teoria quantistica, al modo seguente.

Consideriamo un atomo posto in un campo magnetico H ed indichiamo con μ la componente del momento magnetico dell'atomo parallela al campo. Se il campo H è uniforme, le forze magnetiche agenti sopra l'atomo avranno risultante nullo e non tenderanno quindi a modificarne il moto d'insieme. Ciò non è più vero quando il campo è inomogeneo; si vede infatti facilmente che in questo caso sopra l'atomo viene ad agire una forza che ha per espressione

$$\mu \frac{\delta H}{\delta z} \tag{10}$$

avendo indicata con z la direzione del campo nel punto occupato dall'atomo.

L'esperienza di Stern e Gerlach consiste nel far passare un sottile fascetto di atomi attraverso ad un campo magnetico fortemente inomogeneo.

Il fascio di atomi si ottiene facendo evaporare lentamente una sostanza in un ambiente in cui sia stato fatto un vuoto tanto spinto che gli atomi evaporati possano attraversare tutto il recipiente senza subire urti; opportune limitazioni permettono di ottenere un fascio assai sottile. Il campo inomogeneo è fornito da un elettromagnete una delle cui espansioni polari presenta un solco, e l'altra uno spigolo che si affaccia contro il solco. Con questa disposizione il campo magnetico prende un valore assai grande in vicinanza dello spigolo, e va decrescendo rapidamente lontano da esso. Osserviamo ora che, secondo la teoria dei quanti, il momento magnetico μ della (10) può prendere solo certi valori discreti, e quindi anche le forze agenti sui diversi atomi del fascetto avranno valori differenti e discreti. Ciò ha per effetto di deviare in modo diverso i vari atomi del fascio, così che questo si dividerà in tanti fasci parziali corrispondenti ciascuno ad un valore di μ. Stern e Gerlach poterono osservare effettivamente una tale divisione del fascetto e poterono così non solo confermare qualitativamente la teoria quantistica dell'effetto Zeeman, ma anche trovare i valori di μ in ottimo accordo quantitativo con le previsioni teoriche per gli elementi per i quali fu possibile eseguire l'esperienza.

L'effetto magnetico sopra la risonanza ottica.

L'effetto Zeeman, anche quando si abbiano a disposizione dei campi magnetici di intensità grandissima, è sempre assai piccolo e richiede per la sua osservazione mezzi spettroscopici di elevato potere risolutivo. In campi magnetici di pochi Gauss poi esso diventa talmente piccolo che nessuno dei mezzi di alta risoluzione ora noti sarebbe capace di metterlo in evidenza. Tuttavia è riuscito a R. W. Wood di osservare in modo indiretto effetti Zeeman dovuti a campi anche inferiori ad un Gauss, come p. es. il campo magnetico terrestre; e ciò osservando gli effetti esercitati da un debole campo magnetico sopra la risonanza ottica del mercurio. Le esperienze di Wood possono interpretarsi comodamente col modello classico secondo cui la luce viene emessa da un oscillatore armonico isotropo; noi ci atterremo perciò nella loro descrizione ad una tale rappresentazione.

Se si illumina un bulbo di quarzo contenente del vapore di mercurio con la luce di lunghezza d'onda 2536 A emessa da una lampada a mercurio si constata che tale luce viene diffusa in modo assai intenso dal vapore di mercurio (fenomeno della risonanza ottica). L'interpretazione classica di questo fenomeno è la seguente: L'atomo di mercurio contiene degli oscillatori aventi la frequenza della riga 2536; quando l'atomo si illumina con luce di questa stessa frequenza tali oscillatori si mettono in risonanza e diventano perciò a loro volta centri di emissione di luce della stessa frequenza, la quale costituisce appunto la luce diffusa.

Se supponiamo che la luce incidente sia polarizzata e che il suo vettore elettrico vibri parallelamente all'asse delle z avremo che anche gli oscillatori atomici saranno sollecitati a vibrare in questa stessa direzione e quindi la luce di risonanza emessa da essi avrà anche essa il piano di polarizzazione parallelo all'asse delle z. Ora Wood constatò che effettivamente in qualche caso i risultati erano conformi a questa previsione teorica mentre in altri casi, senza che apparentemente nulla di essenziale fosse cambiato nei suoi dispositivi, le cose andavano in modo diverso. Dopo alcune vane ricerche Wood riuscì finalmente a riconoscere che la causa di questi risultati contraddittori era da ricercarsi nella diversa orientazione dei suoi apparecchi rispetto al campo magnetico terrestre o ai debolissimi campi magnetici dovuti a pezzi in ferro del suo apparec-

Digitized by Google

chio; per renderci conto di questo esaminiamo come deve presentarsi il fenomeno della risonanza quando l'atomo risonante si trova in un campo magnetico. Come abbiamo visto a proposito della teoria di Lorentz dell'effetto Zeeman, il campo magnetico ha per effetto di scindere il moto dell'oscillatore in tre moti armonici di frequenze leggermente differenti, uno lineare parallelo al campo e due circolari in senso positivo e negativo attorno al campo. Se ora il vettore elettrico della luce eccitante vibra parallelamente al campo, di queste tre vibrazioni resterà eccitata soltanto quella lineare e tutto andrà quindi come in assenza di campo; se invece il vettore elettrico della luce vibra perpendicolarmente al campo, resteranno eccitate le due componenti circolari, per modo che da una linea di osservazione perpendicolare al campo la luce apparirà polarizzata rettilineamente, mentre, osservando nella direzione del campo si vedranno le due componenti polarizzate circolarmente, quando i mezzi di risoluzione usati siano sufficienti a separarle, se invece la differenza delle due componenti è più piccola del potere risolutivo, ciò che in pratica accade sempre con campi magnetici piuttosto deboli, le due componenti circolari si sovrapporranno in modo che la luce apparirà completamente depolarizzata.

L'esperienza conferma in modo completo questi risultati teorici sopra la azione depolarizzante di un campo magnetico, dandoci così un mezzo di riconoscere la presenza di un effetto Zeeman anche quando la sua larghezza sia assai minore della larghezza delle righe spettrali.

Polarizzazione rotatoria magnetica.

Come abbiamo visto nella introduzione, il piano di polarizzazione di un raggio di luce che si propaga in un mezzo trasparente isotropo parallelamente alle linee di forza di un campo magnetico in cui il mezzo si trova immerso, subisce una rotazione attorno alla direzione di propagazione via via che la luce avanza nel mezzo (Effetto Faraday).

L'angolo α di cui rota il piano di polarizzazione può esprimersi per corpi non ferromagnetici con la formula

$$\alpha = C\, l\, H$$

dove l è la lunghezza del cammino percorso dalla luce nel campo magnetico, H l'intensità del campo e C una costante (detta costante di Verdet). Tale costante dipende, oltre che dalle varie sostanze, anche dalla lunghezza d'onda; si suole dare ad essa il segno $+$ o $-$, secondo che la rotazione avviene nel verso della corrente che genera il campo magnetico o in quello opposto. Esprimendo la rotazione in minuti di arco, la costante di Verdet ha per l'acqua e per la luce D del sodio il valore 0,013; per il solfuro di carbonio 0,04.

Possiamo giungere ad una spiegazione teorica di questo fenomeno in base agli stessi principi che ci hanno spiegato l'effetto Zeeman, e cioè in base al teorema di Larmor. Astraendo da ogni considerazione quantitativa, possiamo infatti interpretare il fenomeno al modo seguente. Ricordiamo anzitutto che l'esistenza di un potere rotatorio, sia esso naturale o magnetico, equivale ad una differenza nella velocità di propagazione della luce polarizzata circolarmente in sensi opposti attorno all'asse che presenta il potere rotatorio. Se infatti abbiamo un raggio di luce polarizzata rettilineamente che si propaga parallelamente all'asse, questo può sempre decomporsi in due raggi, di eguale ampiezza, polarizzati circolarmente nei due versi opposti. Se ora questi due raggi avessero lo stesso indice di rifrazione essi si troverebbero, in ogni punto dell'asse, con la stessa differenza di fase, per modo che, interferendo tra di loro, ricostituirebbero di nuovo una vibrazione rettilinea, sempre parallela alla direzione iniziale; invece, se i due raggi polarizzati circolarmente hanno indice di rifrazione diverso, la loro differenza di fase va mutando via via che ci si avanza lungo l'asse, cosicchè i due raggi ricostruiscono sempre per interferenza una vibrazione rettilinea, la cui direzione varia però da punto a punto dell'asse; ed in ciò consiste appunto il potere rotatorio.

Per renderci conto del potere rotatorio magnetico, basterà dunque che mostriamo che il campo produce una differenza tra gli indici di rifrazione dei due raggi polarizzati circolarmente. Osserviamo per questo che la dispersione di un corpo dipende dal fatto che la ampiezza dello spostamento dei suoi elettroni sotto l'azione del campo elettrico della luce, varia con la frequenza di questo; tale variazione è particolarmente rapida quando la frequenza della luce è vicina ad una riga o banda di assorbimento del corpo, poichè in questo caso si produce un fenomeno di risonanza (dispersione anomala). Ora ricordiamo che la perturbazione prodotta da un campo magnetico sul moto di un sistema di elettroni, consiste nell'imprimere a questo un moto rotatorio attorno alla direzione del campo che, almeno nei casi più semplici, può calcolarsi per mezzo del teorema di Larmor. Se quindi riferiamo il moto degli elettroni ad un sistema di assi che roti con la frequenza di Larmor, rispetto ad essi il moto elettronico avverrà come se gli assi fossero fissi e non ci fosse il campo magnetico. Se i nostri elettroni si trovano sotto l'azione di luce di frequenza ν polarizzata circolarmente, la frequenza con cui gira il vettore elettrico rispetto al sistema degli assi rotanti sarà $\nu - \nu_L$ oppure $\nu + \nu_L$, secondo che il senso della polarizzazione rotatoria coincide o è opposto a quello della rotazione di Larmor. Secondo che si verifica l'uno o l'altro di questi casi, la frequenza da cui vengono sollecitati gli elettroni è $\nu \mp \nu_L$, e quindi essi vengono a reagire sopra la luce in modo differente dando luogo alla differenza d'indice di rifrazione della luce polarizzata circolarmente nei due sensi, cioè al potere rotatorio magnetico.

Nel caso delle sostanze paramagnetiche può aversi anche un potere rotatorio magnetico derivante dall'orientamento magnetico delle molecole.

Questa teoria ci permette anche di interpretare un fenomeno scoperto da Macaluso e Corbino nel 1898, consistente in un potere rotatorio magnetico anormalmente intenso e rapidamente variabile con

Digitized by Google

la frequenza che si osserva in vicinanza delle righe di assorbimento di un vapore. Si potè arrivare, in queste condizioni, ad osservare rotazioni magnetiche fino a 700° (Le prime osservazioni di Macaluso e Corbino furono fatte osservando con un reticolo, la luce passata attraverso ad una fiamma di sodio interposta tra due nicol). Questo fenomeno ci appare infatti come una conseguenza della dispersione anomala che si ha in vicinanza di una riga d'assorbimento ; essa ha appunto per conseguenza una considerevole differenza di indice di rifrazione per le due frequenze $\nu - \nu_L$ e $\nu + \nu_L$ cioè un forte potere rotatorio.

La luce nei corpi ferromagnetici.

Un altro caso in cui si osservano poteri rotatori magnetici assai forti, benchè dovuti a cause assai differenti, è quello in cui si fa passare la luce attraverso ad una laminetta di ferro o di altri corpi ferromagnetici magnetizzata e tanto sottile da essere trasparente. Nel ferro magnetizzato a saturazione si possono osservare in questo modo delle rotazioni del piano di polarizzazione che arrivano fino a 200.000 gradi per cm.

Un altro fenomeno che presenta un intimo legame con quello qui descritto è il fenomeno magneto-ottico di Kerr, che consiste in una alterazione dello stato di polarizzazione della luce per effetto di una riflessione sopra una superficie speculare di ferro intensamente magnetizzato.

Si capisce come questo fenomeno possa presentare una varietà di aspetti assai notevole secondo l'angolo di incidenza, la polarizzazione della luce e la orientazione della forza magnetica ; in genere l'effetto consiste nel trasformare in luce ellittica la luce polarizzata rettilineamente. Il caso più semplice si ha studiando la riflessione normale di luce polarizzata rettilineamente sopra uno specchio di ferro magnetizzato perpendicolarmente alla sua superficie. In questo caso la luce riflessa, come hanno mostrato alcune ricerche del Righi, è polarizzata ellitticamente, ed inoltre l'asse maggiore dell'ellisse è rotato rispetto al piano di polarizzazione della luce incidente. Questo fatto è dovuto al diverso indice di rifrazione, ed al diverso assorbimento che ha nel ferro magnetizzato la luce polarizzata circolarmente nei due sensi opposti.

Birifragenza elettrica e magnetica.

Quando un corpo isotropo viene inserito in un campo elettrico o magnetico esso diventa birifrangente, e si comporta otticamente come un cristallo unissiaco, il cui asse ottico abbia la direzione nel campo.

La birifrangenza elettrica fu scoperta da Kerr nel 1875 e si chiama perciò spesso effetto Kerr. Le prime esperienze furono fatte col vetro : una lastra di vetro veniva interposta fra due nicol incrociati, e le venivano applicati due elettrodi in modo da poter produrre in essa un campo elettrico, le cui linee di forza formavano un angolo di 45° coi piani di polarizzazione di entrambi i nicol. In assenza di campo elettrico i due nicol producono l'estinzione della luce ; il campo elettrico invece, rendendo birifrangente il vetro permette il passaggio di un po' di luce attraverso al sistema.

In un primo tempo si pensò che il fenomeno della birifrangenza elettrica non fosse sostanzialmente distinto da quello della birifrangenza dovuta ad una compressione, poichè la birifrangenza elettrica veniva interpretata come dovuta alla deformazione del vetro prodotta per elettrostrizione dal campo elettrico. In seguito però si riconobbe che tale interpretazione era errata, poichè fu osservata la birifrangenza elettrica anche nei liquidi e nei gas per i quali naturalmente non può parlarsi di una elettrostrizione anisotropa.

La birifrangenza elettrica può misurarsi per mezzo della differenza tra gli indici di rifrazione n_s ed n_o dei raggi straordinario e ordinario.

Tale differenza è proporzionale al quadrato del campo elettrico, per modo che si può porre

$$n_s - n_o = B \lambda E^2$$

dove E è il campo (in unità elettrostatiche), λ la lunghezza d'onda ; B si dice costante dell'effetto Kerr. B dipende dai vari corpi ed anche dalla lunghezza d'onda. Per il solfuro di carbonio si ha $B = 3{,}7 \cdot 10^7$.

Anche la birifrangenza magnetica, scoperta da Cotton, soddisfa alle stesse leggi. La sua costante, per il nitrobenzene ha il valore $2{,}53 \cdot 10^{-12}$.

Secondo Langevin sia la birifrangenza elettrica che quella magnetica sono dovute, nella maggior parte dei casi, alla azione orientatrice del campo elettrico o di quello magnetico sopra le molecole del corpo. La orientazione magnetica delle molecole di sostanze paramagnetiche è determinata dal fatto che tali molecole hanno un momento magnetico il quale tende ad orientarsi parallelamente al campo ; d'altra parte l'agitazione termica tende invece a dare alle molecole una distribuzione di orientazione uniforme, per modo che, ad ogni temperatura, viene a stabilirsi un equilibrio statistico tra queste due azioni che ha per conseguenza un addensamento degli assi magnetici nella direzione del campo.

La azione orientatrice del campo elettrico può essere dovuta a due cause diverse : infatti le molecole di alcune sostanze (p. e. dell'acqua) hanno un momento elettrico, e per queste il meccanismo dell'orientamento elettrico è in tutto analogo a quello dell'orientamento magnetico delle molecole paramagnetiche; ma anche quando le molecole non abbiano un momento elettrico permanente, si può tuttavia in certi casi avere un orientamento elettrico.

Ammettiamo infatti che le molecole del corpo che si considera siano elettricamente anisotrope ed abbiano quindi tre assi principali di polarizzabilità elettrica differente. Se poniamo una tale molecola in un campo elettrico la sua energia verrà allora a dipendere dalla orientazione, e sarà precisamente minima o massima secondo che il campo elettrico è parallelo all'asse di massima o minima polarizzabilità della molecola.

Il campo elettrico tenderebbe perciò a disporre tutte le molecole coll'asse di massima polarizzabilità parallelo a sè ; per effetto della agitazione termica si viene anche in questo caso stabilire un equilibrio

Digitized by Google

statistico, che ha per risultato un addensamento degli assi di massima polarizzabilità nella direzione del campo. Come conseguenza dell'orientamento, qualunque sia la sua causa, la costante dielettrica del corpo viene a dipendere dalla direzione; a questa anisotropia della costante dielettrica corrisponde naturalmente anche una anisotropia dell'indice di rifrazione, cioè una birifrangenza.

La teoria dell'orientamento si presta anche alla interpretazione della birifrangenza elettrica osservata da Block nelle nebbie, e della birifrangenza magnetica delle sospensioni di ferro colloidale, osservata da Maiorana.

Effetto Stark.

Dopo la scoperta di Zeeman che le righe spettrali vengono scisse in componenti da un campo magnetico, si presentava naturale la ricerca di una eventuale scissione delle righe per effetto di un campo elettrico. Ciononostante fu soltanto nel 1913 che riuscì a Stark di mettere in evidenza per la prima volta un tale fenomeno. Ciò è dovuto sostanzialmente alla difficoltà di produrre un intenso campo elettrico in seno ad un gas o vapore che emetta la luce, poichè un gas emittente è quasi sempre anche un conduttore elettrico. Tale difficoltà fu superata a breve distanza di tempo e con metodo differente da Stark e da Lo Surdo.

L'apparecchio di Stark è sostanzialmente un tubo a raggi canale, pieno di idrogeno; immediatamente dietro al catodo bucato si trova un elettrodo secondario. Tra il catodo e questo elettrodo viene stabilita una forte differenza di protenziale la quale, data la brevissima distanza tra i due elettrodi, non provoca la scarica disruptiva. I raggi canale, uscendo dai fori del catodo, vengono a trovarsi nel forte campo elettrico dovuto alla differenza di potenziale tra catodo ed elettrodo secondario, per modo che su di essi può osservarsi la scissione elettrica delle righe spettrali.

L'apparecchio di Lo Surdo consiste invece semplicemente in un tubo ad idrogeno del tipo dei tubi di Plücker, nel quale però la parte prossima al catodo è costituita da un sottile capillare. Ciò ha per effetto di produrre, vicino al catodo, una forte caduta di tensione, ed è appunto in questa che si osserva il fenomeno.

Le ricerche eseguite con questi metodi hanno dimostrato che le righe della serie di Balmer dell'idrogeno si scindono nel campo elettrico in numerose componenti, polarizzate alcune parallelamente altre perpendicolarmente al campo.

L'ordine di grandezza dell'effetto Stark nell'idrogeno è notevolmente più grande di quello dell'effetto Zeeman, infatti con campi elettrici intensi si può ottenere comodamente una scissione delle righe in cui la distanza tra le componenti esterne supera i 20 A.

Al pari dell'effetto Zeeman, anche l'effetto Stark ha avuta una notevole influenza sopra lo sviluppo delle nostre conoscenze sulla struttura dell'atomo; e ciò specialmente perchè è stato possibile, per mezzo della teoria di Bohr, rendere conto in modo completo, sia qualitativo che quantitativo, dell'effetto Stark dell'idrogeno.

Il principio generale di tale intrepretazione, dovuta a Epstein e Schwarzschild, è il seguente: Un atomo di idrogeno in un campo elettrico esterno è un sistema meccanico costituito da un elettrone mobile sotto l'azione della attrazione Coulombiana verso il nucleo (che può al solito con grande approssimazione considerarsi come fisso) e della forza costante derivante dalla azione del campo elettrico esterno. Il moto di questo sistema può facilmente integrarsi (riferendosi a coordinate paraboliche aventi l'asse nella direzione del campo esterno) e si possono poi applicare ad esso le condizioni di Sommerfeld per la determinazione degli stati stazionari. Si trova così che un livello energetico che, in assenza di campo, appariva come semplice, viene, sotto l'azione del campo elettrico a spezzarsi in parecchi livelli ravvicinati tra di loro, la cui distanza dal livello originario cresce, in prima approssimazione, in modo proporzionale al campo. Siccome poi le frequenze delle righe spettrali sono proporzionali (per il fattore 1/h) alle differenze delle energie degli stati stazionari, si avrà che anche le righe verranno a spezzarsi in tante componenti. Il principio di corrispondenza permette poi di valutare l'intensità di tutte queste componenti.

Per renderci conto in modo più intuitivo dell'effetto del campo elettrico sopra lo spettro dell'idrogeno conviene che esaminiamo la perturbazione del moto Kepleriano dell'elettrone, dovuta al campo elettrico esterno. Se non ci fosse il campo esterno l'elisse Kepleriana conserverebbe posizione invariabile nello spazio (a prescindere dalla lentissima precessione dovuta alla perturbazione relativistica). Il campo elettrico ha per effetto di imprimere all'elisse un moto relativamente lento periodico; precisamente se consideriamo il secondo fuoco dell'elisse (cioè quello non occupato dal nucleo) esso si muove descrivendo, in un piano perpendicolare al campo esterno una elisse armonica con frequenza proporzionale al campo elettrico. Se decomponiamo armonicamente il moto elettronico troviamo allora che le frequenze delle componenti armoniche sono le frequenze di combinazione tra la frequenza fondamentale del moto Kepleriano e la frequenza della perturbazione secolare; ed è appunto a questa combinazione delle due frequenze che corrisponde lo spezzamento delle righe in componenti. (Conviene però osservare che, se non ci fosse la determinazione quantistica delle orbite nel campo esterno, l'effetto Stark dovrebbe presentarsi come un allargamento delle righe, invece che come una scissione in componenti). La fig. 2 dà lo schema delle componenti in cui si spezza la righa H_α dell'idrogeno. Le righe successive della serie di Balmer si separano in un numero di componenti che va crescendo col numero d'ordine della riga.

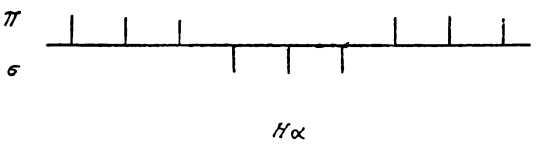


Fig. 2.

Digitized by Google

Effetto Stark sopra gli spettri degli elementi.

L'azione del campo elettrico sopra lo spettro dell'atomo di idrogeno è notevolmente diversa da quella sopra gli spettri degli altri atomi. Nel caso degli altri atomi l'effetto Stark può consistere sia, come per l'idrogeno, in una decomposizione delle righe in componenti, sia in uno spostamento delle righe dalla posizione che esse occupano in assenza del campo sia infine nell'apparire di nuove righe. In tutti questi casi però la distanza delle componenti dalla riga imperturbata (o, nel caso di righe che appaiono sotto l'azione del campo, dalla loro posizione limite per campo nullo) è proporzionale al quadrato dell'intensità del campo e non direttamente proporzionale a questa, come avveniva per l'idrogeno.

La spiegazione di questo comportamento singolare dell'idrogeno rispetto agli altri elementi è da ricercarsi nella circostanza seguente. Se consideriamo l'orbita Kepleriana descritta dall'elettrone dell'idrogeno vediamo subito che essa, tutte le volte che la sua eccentricità è differente da zero, possiede un momento elettrico diverso da zero anche in media. Invece il moto degli elettroni di valenza degli altri atomi può in prima approssimazione descriversi come un moto periodico piano con sovrapposta una precessione di frequenza comparabile con la frequenza del moto periodico, per modo che la media del momento elettrico dell'atomo viene ad essere zero. Osserviamo ora che l'aumento dell'energia di un atomo in un campo elettrico esterno è il prodotto scalare dell'intensità del campo per il momento elettrico dell'atomo. In media tale energia sarà dunque nulla per tutti gli atomi fuorchè per l'idrogeno. Ora è appunto a tale energia che è dovuto, in prima approssimazione, l'effetto Stark, e ciò ci spiega dunque il differente comportamento dell'idrogeno e degli altri elementi. A tutto rigore si può osservare che, per effetto della perturbazione relativistica, anche l'orbita dell'idrogeno è animata da un movimento di precessione, siccome però tale movimento è lentissimo si può facilmente riconoscere che il suo effetto diventa trascurabile già per campi elettrici assai piccoli.

Le considerazioni precedenti ci conducono anche a prevedere che l'effetto del campo elettrico debba essere tanto più forte, quanto minore è la velocità di precessione dell'orbita elettronica; ora la frequenza di tale precessione corrisponde alla differenza tra la frequenza del termine spettrale che si considera e la frequenza del termine balmeriano che ad esso corrisponde. Dobbiamo dunque attenderci che l'effetto del campo elettrico sarà tanto maggiore quanto più piccola è la differenza tra i termini dello spettro che si considera e i termini corrispondenti dello spettro dell'idrogeno.

Tale induzione teorica si trova pienamente confermata dall'esperienza. Si vede infatti che l'elio, i cui termini sono assai vicini a quelli dell'idrogeno, presenta un effetto Stark di entità non molto minore di quella dell'idrogeno mentre p. e. le righe del sodio presentano un effetto Stark tanto piccolo che la sua osservazione è riuscita solo recentemente a Ladenburg, con l'uso di mezzi delicatissimi.

Abbiamo detto che, in alcuni casi il campo elettrico può produrre l'apparizione di nuove righe spettrali. Tale fatto fu osservato per la prima volta nello spettro dell'elio dalla Sig.na Brunetti. Per rendercene conto teoricamente; osserviamo come, secondo la teoria di Bohr, le frequenze delle righe di un atomo si calcolino come differenze di termini spettrali; non però a tutte le differenze di termini corrisponde una riga che l'atomo può effettivamente emettere; perchè la riga sia emessa effettivamente occorre che nello sviluppo in serie di Fourier del moto dell'elettrone luminoso sia rappresentata, con ampiezza diversa da zero, la componente armonica corrispondente ad essa.

Ora il campo elettrico, perturbando lievemente il moto dell'elettrone luminoso, ne altera lo sviluppo in serie di Fourier, per modo che talune componenti, che nel modo impeturbato avevano ampiezza nulla, vengono a comparire nel moto perturbato. Al comparire di queste componenti armoniche corrisponde appunto il comparire delle nuove righe.

Dobbiamo da ultimo accennare ad una caratteristica manifestazione dell'effetto Stark che consiste nel fatto che le righe emesse da un vapore vengono, allargate o spostate quando si cresce la pressione dell'ambiente in cui si trova il vapore emittente. Secondo Stark tale effetto deve interpretarsi col fatto che gli atomi del corpo emittente, trovandosi nelle vicinanze di altri atomi, vengono ad essere immersi nel campo elettrico generato da questi; e tale campo produce l'effetto Stark sopra le righe emesse. Naturalmente data la variabilità di questi campi elettrici molecolari l'effetto si manifesta come un allargamento delle righe invece che come separazione in componenti. Dobbiamo naturalmente attenderci che la presenza di ioni, che sono circondati da un campo elettrico assai intenso, produca un allargamento alle righe particolarmente notevole; ciò è confermato dal fatto che i maggiori allargamenti si osservano nelle scariche condensate. In particolari condizioni si possono così ottenere allargamenti delle righe della serie di Balmer così grandi che esse arrivano a sovrapporsi tra di loro, dando luogo ad una specie di spettro continuo.

Le righe in cui effetto Stark è più debole che nell'idrogeno presentano anche un effetto di pressione più piccolo.

Digitized by Google

PROF. ENRICO PERSICO

ISTITUTO FISICO R. UNIVERSITÀ DI FIRENZE

FENOMENI GALVANO E TERMO-MAGNETICI NEI METALLI

Digitized by Google

Digitized by Google

1. - *Considerazioni intuitive sull'effetto Hall.*

Scriveva il Maxwell nel 1873: « Bisogna ricordar bene, che la forza meccanica che si esercita su un conduttore percorso da una corrente e immerso in un campo magnetico, agisce non sulla corrente elettrica, ma sul conduttore che la trasporta ».

Ma un altro punto di vista, a priori almeno altrettanto plausibile, condurrebbe ad assimilare le linee di corrente, che percorrono un conduttore metallico, ed altrettanti sottilissimi fili conduttori flessibili, i quali, se immersi in un campo magnetico, risentono la nota forza elettrodinamica di Ampère che li sollecita trasversalmente, e la trasmettono al conduttore metallico che li racchiude; e se questo conduttore è mantenuto fisso, si spostano in seno ad esso addensandosi in una parte della sezione e diradandosi nell'altra.

Ciò dovrebbe produrre un aumento di resistenza in un filo metallico, immerso in un campo magnetico trasversale: Hall, per verificare la suddetta ipotesi, ricercò tale aumento di resistenza nell'argento, ma l'esito fu negativo. Egli pensò allora che forse la corrente era da considerarsi come un fluido incompressibile, quindi incapace di addensarsi in una parte del conduttore, ma capace, se una forza ve lo spinga, di *tendere* verso un lato del conduttore (e di uscirne, se glie lo permette una opportuna diramazione). Tale tendenza delle linee di corrente a spostarsi trasversalmente dovrebbe manifestarsi come una f.e.m. trasversale, perpendicolare alla corrente e al campo magnetico, e diretta secondo la nota regola di Fleming. Se quindi una lamina metallica rettangolare (fig. 1) percorsa da corrente nel verso

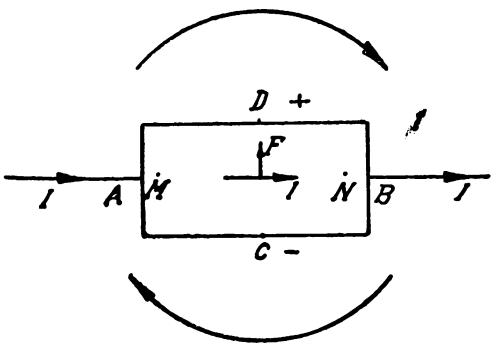


Fig. 1.

AB, è immersa in un campo magnetico ad essa perpendicolare e diretto dall'osservatore verso il foglio (quale sarebbe prodotto da una elettrocalamita in cui la corrente circolasse nel verso delle frecce arcuate) dovrebbe manifestarsi una d.d.p. tra *C* e *D*, e precisamente (poichè la forza Amperiana *F* risulta diretta verso l'alto) dovrebbe *D* risultare a potenziale più alto di *C*: collegando questi due punti attraverso un galvanometro (circuito secondario) questo dovrebbe accusare una corrente uscente dalla lamina in *D* e rientrante in C., la quale si potrebbe interpretare come una deviazione della corrente primaria *I*, soffiata trasversalmente, per così dire, dal campo magnetico.

Sperimentando su una sottile foglia d'oro, guidato da queste considerazioni, Hall, nel 1879, scoprì il fenomeno al quale è legato il suo nome, e aprì in tal modo la via allo studio di una vasta categoria di fenomeni, parzialmente analoghi ad esso, e riguardanti l'influenza del campo magnetico su una corrente elettrica, o una corrente termica, attraversante un metallo (fenomeni *galvanomagnetici* i primi, *termomagnetici* i secondi).

Ma l'esperienza di Hall, ripetuta in seguito molte volte e con vari metalli, diede un risultato inatteso: mentre le precedenti considerazioni di carattere intuitivo farebbero a prima vista ritenere che il fenomeno fosse indipendente dalla natura del conduttore, si trovò invece che non solo l'entità dell'effetto è diversissima nei vari conduttori, ma per molti di essi (antimonio, cadmio, grafite, cerio, cobalto, iridio, ferro, acciaio, piombo, molibdeno, silicio, tantalio, tellurio, tallio, tungsteno e zinco) il fenomeno avviene addirittura in senso contrario a quello previsto. Si conclude dunque che i due punti di vista enunciati in principio di questo § sono entrambi errati, poichè è vero che il campo magnetico ha, o può avere, un'azione sulle linee di corrente, ma non è esatto assimilare queste linee a conduttori flessibili, e assimilare l'esperienza di Hall a quella delle correnti mobili di Ampère: se questo fu, in sostanza, il concetto che spinse a tali ricerche, l'esito di queste lo ha poi rivelato come un errore, pur fecondo di verità. Secondo le moderne teorie, la causa dei due ordini di fenomeni è la stessa (azione elettrodinamica del campo magnetico sugli elettroni in movimento) ma agisce nei due casi attraverso meccanismi differenti.

Digitized by Google

2. - *Descrizione qualitativa degli effetti trasversali.*

Se, nella lamina della fig. 1, percorsa da corrente elettrica nel verso AB, si applicano, in C e D, al posto degli elettrodi secondari, due pinze termoelettriche, si constata, nel campo magnetico, una differenza di temperatura fra quei due punti. Questo fenomeno prende il nome di effetto von Ettingshausen.

Due fenomeni del tutto analoghi a questi (differenza trasversale di temperatura e di potenziale) si hanno quando la lamina è percorsa nel senso AB da una corrente termica anzichè da una elettrica (fenomeni termomagnetici trasversali), e prendono il nome rispettivamente di effetto Righi e effetto Nernst.

I quattro fenomeni galvano e termomagnetici trasversali hanno di comune che:

la differenza trasversale di temperatura o di potenziale che si osserva tra i punti C e D si inverte quando si inverte la corrente primaria (sia questa elettrica o termica) lasciando inalterato il campo oppure quando si inverte il campo, lasciando inalterata la corrente. Ciò è prevedibile, del resto, per ragioni di simmetria. Inoltre, per una data lamina, l'effetto è proporzionale all'intensità della corrente primaria e, in prima approssimazione, all'intensità del campo. La sua entità, e il suo segno, variano nei differenti conduttori.

Particolarmente notevole a questo riguardo è il bismuto che presenta questi fenomeni in misura eccezionalmente intensa rispetto agli altri metalli: per es., l'effetto Hall è nel bismuto 10.000 volte più intenso che nell'oro. Questo fatto, scoperto dal Righi, gli permise di osservare l'effetto Hall con campi debolissimi, come quello terrestre e quello generato da un semplice ago da bussola. Anche l'antimonio dà dei fenomeni termo e galvanomagnetici eccezionalmente rilevanti, sebbene non così imponenti come il bismuto.

3. - *Ordine di grandezza degli effetti trasversali.*

Supponiamo che la lamina abbia le dimensioni di cm. 1×3, lo spessore di mm. 0,5, e sia percorsa, nel senso della lunghezza, da una corrente di 1 Amp. Se il campo magnetico è di 3000 Gauss si trova allora per il bismuto:

effetto Hall: d.d.p. fra C. e D, 0,36 millvolta
» von Ettingshausen: d.d.t » » 0,30°

Nel rame il primo effetto è 10.000 volte più piccolo, e il secondo 35.000.

Supponiamo ora invece che la stessa lamina sia percorsa (nel senso della lunghezza) da un flusso termico, il che si ottiene praticamente introducendo gli estremi A, B in due scanalature praticate longitudinalmente in due tubi metallici (a tenuta idraulica) percorsi uno da vapore a 100° e l'altro da acqua a 20°. In un campo ancora di 3000 Gauss si ha per il bismuto:

effetto Nernst: d.d.p. fra C e D, 0,12 millivolta
» Righi: d.d.t. » C e D 0,15°

Nel rame il primo effetto è 1000 volte più piccolo, il secondo soltanto 10 volte minore.

4. - *Descrizione qualitativa degli effetti longitudinali.*

Se ad una lamina metallica percorsa da una corrente elettrica da A a B (fig. 1), si applicano in due punti M, N dell'asse, due *sonde* di potenziale (vale a dire, due elettrodi collegati con un Galvanometro) si trova naturalmente come differenza di potenziale quella voluta dalla legge di Ohm. Ma se la lamina è immersa in un campo magnetico ad essa normale, si sovrappone alla d.d.p. ohmica primitiva una d.d.p. supplementare, dovuta al campo. È questo un fenomeno galvanomagnetico longitudinale, che si può interpretare, evidentemente, come una variazione di resistenza della lamina per effetto del campo magnetico: esso è presentato in modo particolarmente notevole dal bismuto.

Supponiamo ora di porre invece in M, N due sonde di temperatura, cioè due pinze termoelettriche, e supponiamo da principio che non vi sia campo magnetico, ma che la lamina sia percorsa longitudinalmente dalla solita corrente elettrica. La differenza di temperatura che si osserva (con le precauzioni che indicheremo in seguito) fra M e N dipende dalle condizioni termiche cui sono sottoposte le superficie e il contorno della lamina. Eccitando il campo, tale differenza di temperatura si altera, e l'alterazione costituisce un altro fenomeno galvanomagnetico longitudinale.

Similmente, quando la corrente primaria è una corrente termica, si hanno due fenomeni termo-magnetici longitudinali perfettamente analoghi.

Infine, oltre questi quattro fenomeni galvano- e termo-magnetici longitudinali a *campo trasversale*, se ne hanno altrettanti a campo longitudinale, vale a dire: la differenza di temperatura e di potenziale tra due punti M e N, in un conduttore percorso da corrente elettrica o flusso termico nel senso MN, è alterata da un campo magnetico parallelo alla corrente stessa.

Tutti gli otto fenomeni longitudinali hanno di caratteristico (come vuole la simmetria) di essere indipendenti dal verso del campo magnetico (mentre si invertono invertendo la corrente primaria): essi quindi sono, in prima approssimazione, proporzionali al quadrato del campo (mentre sono semplicemente proporzionali all'intensità della corrente).

La piccola entità di quasi tutti i fenomeni longitudinali ne rende generalmente assai più difficile lo studio sperimentale. Fa eccezione la variazione di resistenza elettrica del bismuto la quale è talmente rilevante da permettere di utilizzare il fenomeno per la misura pratica della intensità di un campo magnetico. Infatti, per un campo di 2500 Gauss tale aumento è già del 6 %, e per 10.000 Gauss è del 60 % (a temperatura ordinaria). La legge di dipendenza è però piuttosto complicata, e vi ha notevole influenza la temperatura.

Digitized by Google

5. - *Teoria fenomenologica degli effetti trasversali* (di 1° ordine).

L'esistenza degli effetti galvano- e termo-magnetici, nonchè di altri fenomeni ai quali accenneremo brevemente in seguito, e che si manifestano anche in assenza di campo (per es., l'effetto Thomson) mostra che la propagazione della elettricità e quella del calore in un metallo sono così intimamente legate tra loro, che non è possibile eseguirne uno studio completo trattandole separatamente, scrivendo cioè un sistema di equazioni contenenti i soli elementi del problema elettrico, e uno contenente i soli elementi termici: esse sono piuttosto da ritenere dominate da un sistema di equazioni in cui intervengono promiscuamente elementi termici ed elettrici. L'insieme di tutti i fenomeni relativi ad una lamina isotropa piana disposta perpendicolarmente al campo, si può ritenere descritto da quattro equazioni lineari, che legano le componenti delle correnti elettrica e termica alle componenti della forza elettrica e del gradiente di temperatura. Potremo scrivere queste equazioni nella forma seguente:

$$(1)\quad \begin{cases} j_x = sX - \lambda T_x - a H Y + a' H T_y \\ j_y = sY - \lambda T_y + a H X - a' H T_x \\ W_x = -kT_x + \mu X + b H T_y - b' H Y \\ W_y = -kT_y + \mu Y - b H T_x + b' H X \end{cases}$$

dove H è il campo magnetico (contato positivamente se diretto verso l'osservatore, essendo gli assi x, y disposti nel modo usuale):

j_x, j_y, sono le componenti della densità di corrente elettrica;

W_x, W_y sono le componenti delle densità di corrente termica;

$X = -\frac{dV}{dx}$, $y = -\frac{dV}{dy}$ sono le componenti della forza elettrica:

$T_x = \frac{dT}{dx}$, $T_y = \frac{dT}{dy}$ sono le componenti del gradiente di temperatura.

Gli otto coefficienti s, k, λ, μ, a, a', b, b' sono costanti caratteristiche del conduttore e, in prima approssimazione, si possono ritenere indipendenti dal campo. Per campi intensi tuttavia, pur seguitando a valere le (1), si deve tenere presente che i coefficienti sono funzioni di H.

Dei coefficienti delle (1), i primi due rappresentano evidentemente: s, la conducibilità elettrica (a temperatura uniforme), e k la conducibilità termica (a potenziale uniforme).

Alle equazioni (1) vanno aggiunge l'equazione di continuità per la corrente elettrica cioè:

$$(2)\quad \frac{dj_x}{dx} + \frac{dj_y}{dy} = 0$$

e, nello stato di regime, e per una lamina a facce termicamente isolate, quella analoga per la corrente termica.

Sostituendo nella (2) e nella sua analoga, le espressioni (1) di j_x e j_y, W_x e W_y, si ha

$$\begin{aligned} s\Delta_2 V - \lambda \Delta_2 T &= 0 \\ -k\Delta_2 T + \mu \Delta_2 V &= 0 \end{aligned}$$

da cui (poichè in generale $sk \neq \lambda \mu$.)

$$\begin{aligned} \Delta_2 V &= 0 \\ \Delta_2 T &= 0. \end{aligned}$$

La continuità richiede dunque che tanto V che T siano funzioni armoniche. Queste condizioni non si applicano naturalmente, in quelle regioni della lamina in cui eventualmente entri o esca calore o elettricità dalla superficie. Inoltre tuttociò vale, naturalmente, solo in quanto si prescinda dal calore che si sviluppa nella lamina per effetto Joule: altrimenti non ha più luogo l'equazione di continuità per la corrente termica. Per mettersi in queste condizioni, si approfitta del fatto che l'effetto Joule è proporzionale a j^2, mentre gli effetti di cui ci occupiamo dipendono da j: basta quindi supporre sufficientemente deboli le correnti elettriche. Ma si può anche liberarsi da questa condizione (ed è ciò che si pratica in realtà) eseguendo le misure di T e V due volte, una volta con le correnti elettriche in un senso, una volta con quello inverso, e prendendo per T e V la semidifferenza dei valori trovati, dalla quale, naturalmente, risultano eliminati gli effetti quadratici. Nel seguito, intenderemo sempre tutte le grandezze delle nostre equazioni misurate in queste condizioni.

Prima di passare a dedurre dalle (1) le leggi dei vari effetti galvano e termo-magnetici che sono in esse riassunti, dobbiamo accennare brevemente a due fenomeni che, sebbene non rientrino tra gli effetti galvano e termo-magnetici, perchè si verificano anche senza campo, sono intimamente connessi con la teoria generale della propagazione della elettricità e del calore nei conduttori, e sono anch'essi contenuti nelle (2). Poniamo in queste equazioni $H = 0$, e avremo

$$(1)\quad \begin{cases} j_x = sX - \lambda T_x \\ W_x = -kT_x + \mu X. \end{cases}$$

(le altre equazioni non danno nulla di nuovo: supporremo il conduttore lineare, parallelo all'asse x). Potremo anche scrivere

$$(3)\quad \begin{cases} X = \frac{1}{s} j_x + \sigma T_x \\ T_x = -\frac{1}{k} W_x + T\sigma' X \end{cases}$$

avendo posto

$$(4)\quad \begin{cases} \frac{\lambda}{s} = \sigma \\ \frac{\mu}{k} = T\sigma' \end{cases}$$

La prima di queste equazioni ci dice che in un filo a temperatura non uniforme, nasce per questo solo fatto un gradiente elettrico σT_x, che si sovrappone

Digitized by Google

a quello ohmico derivante dalla corrente elettrica, e che permane anche quando manchi questa. È il fenomeno noto col nome di *effetto Thomson*, che si manifesta, oltrechè direttamente come d.d.p., anche indirettamente per il calore che la corrente elettrica svolge o assorbe nel superare, o discendere, questa d.d.p., quando essa passa da un punto caldo a uno freddo e viceversa.

La seconda equazione contiene la legge di un fenomeno analogo: in un filo i cui estremi siano a differenti potenziali elettrici, nasce per questo solo fatto un gradiente di temperatura $T\sigma' X$ il quale si manifesterebbe anche se nel filo non passasse alcun flusso termico. Questo fenomeno chiamato dal Bridgman *gradiente di temperatura Thomson*, non si rivela direttamente ma interviene indirettamente in parecchi dei fenomeni che ci accingiamo a studiare.

6. - *Lamina a temperatura uniforme.*

Supponiamo che la lamina sia tenuta a temperatura uniforme (condizione realizzata sperimentalmente immergendola in un bagno, oppure facendo passare la corrente elettrica per un tempo assai breve), e ricerchiamo le leggi della propagazione delle correnti elettriche.

Le prime due equazioni (1) danno

$$(5)\quad \begin{cases} j_x = sX - a\,H\,Y \\ j_y = sY + a\,HX \end{cases}$$

e queste esprimono una relazione assai semplice tra la forza elettrica F e la corrente, suscettibile di una interpretazione geometrica suggestiva, dovuta al Corbino. Si consideri un punto qualunque della lamina, e si suppongano provvisoriamente gli assi orientati in modo che l'asse x sia parallelo alla direzione che ha il campo elettrico F in quel punto (fig. 2). Sarà allora ivi $Y = 0$, e quindi, dalle equazioni precedenti

$$(5')\qquad j_x = sX \qquad j_y = a\,HX$$

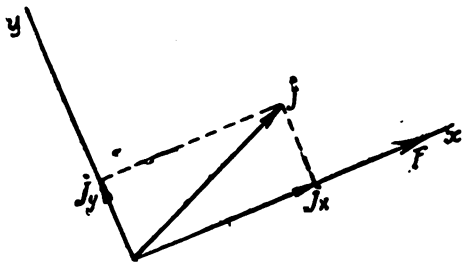


Fig. 2.

da cui $\frac{j_y}{j_x} = \frac{a\,H}{s}$. Se si osserva la figura, si vede che $j_y/j_x = \operatorname{tg}\beta$, dove β è l'angolo tra il vettore F (campo elettrico) e la corrente j: tale angolo dunque (che è evidentemente indipendente dalla particolare orientazione che, per pura comodità, abbiamo dato agli assi) risulta determinato da

$$(6)\quad \operatorname{tg}\beta = \frac{a\,H}{s}$$

ed è perciò lo stesso in tutta la lamina. Si conclude che: mentre, in assenza di campo, le linee di corrente coincidono dovunque con le linee di forza, e quindi sono dovunque normali alle linee equipotenziali, quando esiste il campo esse formano invece con le linee di forza un angolo β dato dalla (6), e quindi, con le equipotenziali un angolo $90°-\beta$. L'angolo β si può considerare come grandezza caratteristica dell'effetto Hall: esso, nel bismuto, può raggiungere i 10°.

L'equazione di continuità dà, come abbiamo visto,

$$(7)\qquad \Delta_2 V = 0$$

cioè la stessa condizione che si ha senza campo.

Quanto alle condizioni al contorno, vi sarà in generale una parte del contorno occupata dagli elettrodi da cui entra ed esce la corrente (i quali si suppongono costituiti di un metallo assai conduttore e in spessore sufficiente, per poterli considerare ciascuno a un potenziale unico in tutti i suoi punti) e una parte del contorno sarà libera, ed elettricamente isolata. Le condizioni allora evidentemente saranno:

I) che i tratti di contorno occupati da elettrodi coincidano con linee equipotenziali,

II) che i tratti di contorno libero coincidano con linee di corrente (poichè la componente di corrente normale al contorno deve esser nulla), e quindi formino un angolo $90°-\beta$ con le equipotenziali. Perciò il problema matematico della determinazione di V si riduce a un particolare problema di Dirichlet, e precisamente si tratta di trovare una funzione $V(x, y)$ che soddisfaccia la (7) in tutta la lamina, e le condizioni I, II al contorno.

Da tuttociò si deducono varie conseguenze importantissime.

In generale, il campo avrà per effetto di ruotare e deformare i due sistemi di linee (di corrente ed equipotenziali) in modo che vengano a formare tra loro l'angolo $90°-\beta$ anzichè 90°, pur seguitando a soddisfare le condizioni (I) e (II) al contorno.

Ma se si osserva, che di queste condizioni la I, cioè quella relativa agli elettrodi, vincola solo le linee equipotenziali, e la II, cioè quella relativa al contorno libero, solo le linee di corrente, si intuisce che, se nessun tratto del contorno è occupato da elettrodi, le linee equipotenziali essendo libere di ruotare in tutti i punti della lamina, la nuova situazione imposta dal campo si potrà stabilire con una semplice rotazione, dell'angolo β, delle linee equipotenziali, senza che occorra alcun spostamento o deformazione delle linee di corrente; se invece nessun tratto del contorno è libero, sono le linee di corrente che son libere di ruotare, e adattarsi a formare l'angolo $90°-\beta$ con le equipotenziali senza che queste vengano alterate. Questi due casi estremi, nei quali il fenomeno si presenta con caratteristiche particolarmente semplici si possono realizzare nei modi illustrati nei §§ seguenti.

Digitized by Google

7. - *L'effetto Hall* (isotermico) *puro.*

Perchè nessun tratto del contorno sia occupato da elettrodi, basta che la corrente venga addotta alla lamina da elettrodi puntiformi, cioè, praticamente, da due (o più) fili saldati in punti della lamina o del suo contorno. Per es. nel caso di una lamina rettangolare con gli elettrodi puntiformi A, B, si ha senza campo la disposizione della fig. 3*a*, nel campo quella della fig. 3*b*: come si vede, le linee orizzontali (linee di

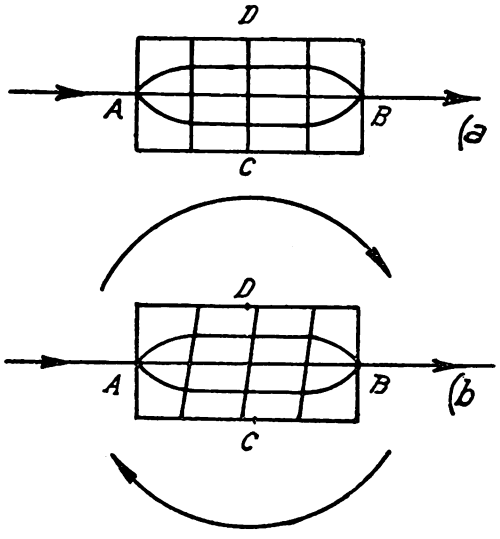


Fig. 3.

corrente) rimangono inalterate, mentre le linee equipotenziali si deformano. Due punti, come C e D, che si trovano originariamente su una stessa equipotenziale, cessano di esserlo per la presenza del campo, e la d.d.p. che si osserva tra di essi costituisce, come è noto, l'effetto Hall. Tale d.d.p. è espressa da una legge assai semplice che ora troveremo.

Consideriamo per maggior generalità una lamina di forma qualunque, ma con soli elettrodi puntiformi, e siano C e D (fig. 4) due punti (interni o

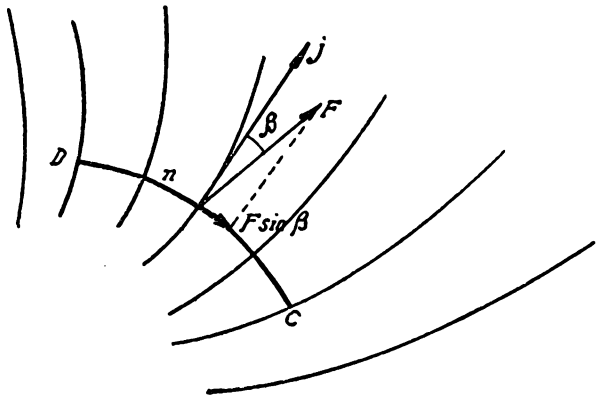


Fig. 4.

al contorno) che, in assenza del campo, giacciono su una stessa equipotenziale n. Quando si eccita il campo la n non sarà più equipotenziale, e perciò la forza F non sarà più normale ad essa, ma avrà lungo la n una componente $\frac{dV}{dn} = F \sin\beta$ (contando le n positivamente da C verso D). La d.d.p. tra C e D si otterrà calcolando

$$V_D - V_C = \int_C^D \frac{dV}{dn}\, dn = \int_C^D F \sin\beta\, dn$$

Per avere F, basta quadrare e sommare le (5) (o più semplicemente le (5'), ottenendo

$$j^2 = (s^2 + a^2 H^2)\, F^2 = s^2 (1 + \mathrm{tg}^2\beta)\, F^2 = \frac{s^2}{\cos^2\beta} F^2$$

da cui

$$F = \frac{\cos\beta}{s} j$$

e sostituendo

$$V_D - V_C = \frac{\sin\beta\cos\beta}{s} \int_C^D j\, dn$$

Ora, l'integrale si esprime subito, osservando che, poichè le linee di corrente sono invariate, e quindi la densità di corrente j è, anche col campo, normale alla n in tutti i suoi punti, ne segue che la corrente totale che attraversa la linea CD è, detto ε lo spessore della lamina,

$$I = \varepsilon \int_C^D j\, dn$$

Quindi l'integrale non è che I/ε, e si ha

$$V_D - V_C = \frac{\sin\beta\cos\beta}{s\,\varepsilon} I.$$

Come si vede, l'effetto è indipendente dalla forma della lamina e dalla posizione degli elettrodi, ma dipende solo, e in modo assai semplice, dalle costanti s, ε e dall'angolo β.

Finchè consideriamo effetti di 1° ordine, potremo ritenere

$$\sin\beta = \beta = \frac{aH}{s}, \quad \cos\beta = 1$$

e scrivere quindi

$$V_D - V_C = \frac{aH}{s^2\varepsilon} I$$

ovvero, raccogliendo in un solo coefficiente tutte le costanti caratteristiche della natura del conduttore, cioè ponendo

$$(8) \qquad R = \frac{a}{s^2}$$

avremo

$$(9) \qquad V_D - V_C = \frac{R\,H\,I}{\varepsilon}$$

Questa legge, valida, come si è visto, sotto condizioni assai più generali di quelle della fig. 3 (purchè le linee di corrente non vengano deformate) è stata trovata sperimentalmente ed è considerata la legge fondamentale dell'effetto Hall. Da essa risulta che, a parità di corrente, lo spessore delle lamine deve essere piccolo, perchè la d.d.p. sia rilevante, e infatti Hall riuscì a scoprire il fenomeno

Digitized by Google

soltanto quando impiegò una sottilissima foglia d'oro anzichè una lamina grossa. Ciò è comprensibile se si pensa che la forza elettrica trasversale Y dipende essenzialmente dalla *densità* di corrente. Ciò si riconosce facilmente anche dalle (5), supponendo la lamina abbastanza allungata per poter ritenere verso il centro $j_y = 0, j_x = j$. Si ha allora dalla seconda delle (5)

$$Y = -\frac{a H}{s} X$$

e sostituendo per X il valore ricavato dalla prima, e trascurando H^2

$$(9^1) \qquad Y = -\frac{a H}{s^2} j = -R H j$$

Il coefficiente R, detto costante di Hall (o coefficiente rotazionale) si determina praticamente servendosi della formola (9) e usando generalmente lamine rettangolari. Esso è considerato positivo quando la rotazione delle linee equipotenziali avviene nel verso in cui circola la corrente nell'elettrocalamita che genera il campo (es. l'antimonio, $R = +0{,}19$ unità e.m. assolute) e negativo nel caso contrario (es. bismuto, $R = -10$; oro, $R = -0{,}0007$) La fig. 1 si riferisce a un caso di coefficiente positivo.

Da R e dalla conducibilità s, si ricava immediatamente (attraverso la (8)) il coefficiente a delle equazioni (1).

Il coefficiente di Hall dipende dalla temperatura ed è assai influenzato da impurezze contenute nel metallo. Aggiungeremo che con il crescere del campo R non si mantiene costante, ma va diminuendo, cosicchè la d.d.p., che dipende da RH, non cresce linearmente con H, ma tende verso una specie di saturazione.

8. - *Le esperienze Corbino.*

Per realizzare l' altro caso estremo (assenza di contorno libero, invarianza delle linee equipotenziali) occorre che la lamina non sia *a connessione semplice*, cioè dotata di un solo contorno, ma presenti almeno due contorni distinti, come nel caso tipico della corona circolare (fig 5), ai quali siano applicati due elettrodi di rame, da uno dei quali entra la corrente e dall'altro esce. Nel caso della corona circolare, le linee equipotenziali (anche per ragione di simmetria) sono circonferenze tanto col campo che senza, mentre le linee di corrente, che senza campo sono rette radiali, divengono col campo spirali logaritmiche (fig. 5*b*). Si può dire che nascono, per effetto del campo, delle correnti circolari che si chiudono nella lamina, e che si sovrappongono alla corrente radiale primitiva. Ed è facile calcolarne l'intensità lungo una qualsiasi circonferenza n di raggio r (fig. 6) : poi-

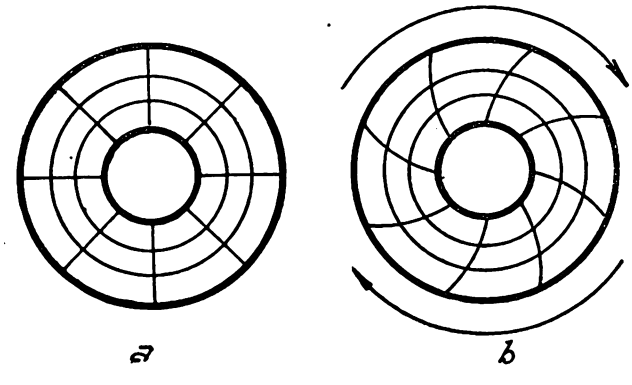


Fig. 5.

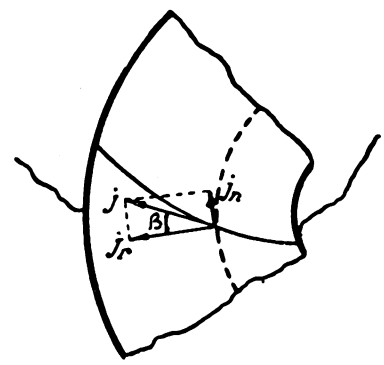


Fig. 6.

chè j forma col raggio l'angolo β, si ha, decomponendola in una componente radiale j_r e una trasversale j_n

$$j_n = j_r \operatorname{tg} \beta$$

e poichè la corrente totale I che attraversa la lamina (ossia quella che attraversa l'intera circonferenza n) è $I = 2\pi r \varepsilon j_r$, si ha

$$(10) \qquad j_n = \frac{I \operatorname{tg} \beta}{2\pi r \varepsilon} = \frac{a}{2\pi \varepsilon s} \frac{H I}{r}.$$

L'unico mezzo per mettere in evidenza queste correnti circolari è offerto dai loro effetti magnetici i quali si manifestano in due modi :

a) circondando la lamina con una bobina concentrica ad essa e collegata a un galvanometro, si constata in questo una corrente indotta quando si lancia o si interrompe la corrente nella lamina, mentre nessuna corrente indotta si verifica in assenza del campo ;

b) la lamina, se non è normale al campo, tende a disporvisi con una coppia proporzionale alla corrente da cui è percorsa ; infatti, essa a causa delle correnti circolari destatevi dal campo, si comporta come una vera lamina magnetica.

Queste due esperienze furono entrambe ideate e realizzate dal Corbino.

Per valutare quantitativamente questi fenomeni si osservi che l'intensità totale delle correnti circolari è (detti r_1, r_2 il raggio interno e quello esterno della corona circolare)

$$(11) \qquad C = \int_{r_1}^{r_2} j_n \varepsilon \, dr = \frac{a}{2\pi s} H I \lg \frac{r_2}{r_1}$$

Digitized by Google

e che, se si tagliasse radialmente la lamina (fig. 7) e, applicati due elettrodi di rame ai bordi del taglio, si stabilisse tra questi una d.d.p. tale da far circolare

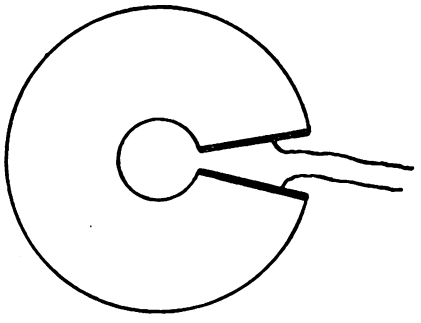


Fig. 7.

nella lamina una corrente totale C, la corrente si distribuirebbe lungo le varie circonferenze con densità proporzionale a $1/r$, e quindi uguale, punto per punto, alla j_n della formola (11): gli effetti della lamina Corbino si possono dunque ritenere equivalenti a quelli che sarebbero prodotti dalla corrente circolare C, distribuita nel modo indicato.

Come si vede dalla (11) il coefficiente caratteristico di tali effetti è

$$\frac{a}{s}\,\frac{\lg r_2/r_1}{2\,\pi}$$

o anche, introducendo, mediante la (8), il coefficiente R di Hall

$$R\,s\,\frac{\lg r_2/r_1}{2\,\pi}$$

L'effetto dipende dunque, oltre che dagli elementi geometrici r_1, r_2 della lamina (non dallo spessore), dal prodotto del coefficiente di Hall per la conducibilità. Le esperienze hanno confermato tale dipendenza.

9. - *L'effetto Hall con elettrodi estesi.*

Quando parte del contoro è libera, e parte occupata da elettrodi (non puntiformi), i fenomeni sono, come abbiamo detto, più complicati, per il fatto che tanto le linee equipotenziali quanto le linee di corrente vengono deformate per effetto del campo.

Così, nel caso di una lamina rettangolare (fig. 8), di cui due lati opposti AA', BB' sono occupati dagli elettrodi, mentre gli altri due lati sono liberi, le linee si deformano nel modo indicato dalla fig. 8*b*: le linee equipotenziali nel centro della lamina conservano *quasi* la forma rettilinea, inclinata dell'angolo β, quelle vicine agli elettrodi sono meno inclinate poichè gli elettrodi sono equipotenziali, e quelle intermedie sono più o meno distorte. Qualcosa di simile avviene per le linee di corrente.

Si può anche interpretare la cosa, pensando che gli elettrodi AA' BB' funzionano come corti circuiti tra i due bordi della lamina tra i quali si stabilisce la d.d.p. Hall: essi quindi tendono a diminuire tale d.d.p. attraverso a correnti locali nella lamina, le quali, sovrapponendosi al primitivo sistema di correnti longitudinali, producono la accennata distor-

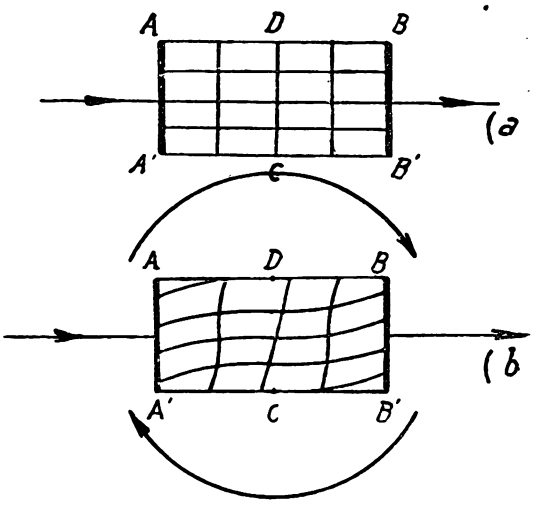


Fig. 8.

sione delle linee di corrente. Naturalmente, se la lamina è molto allungata (fig. 9) la parte centrale, cioè quella più lontana dagli elettrodi, sarà poco influen-

Fig. 9.

zata da tali correnti locali, e perciò le linee di corrente resteranno ivi presso a poco longitudinali, e quindi le equipotenziali rettilinee, come nel caso degli elettrodi puntiformi.

Da tutto ciò si deduce che la d.d.p. che si osserva, per effetto del campo, tra i punti C e D (fig. 8) non rappresenta l'effetto Hall puro, ma è affetta da una perturbazione, dovuta agli elettrodi, che tende a diminuirne l'entità, e che è tanto più rilevante, quanto più corta è la lamina (nel senso AB) rispetto alla sua lunghezza: solo nel caso di una lamina allungatissima (fig. 9) la d.d.p. osservata dà una vera misura dell'effetto Hall.

Si ha cioè il risultato paradossale che, mentre sembrerebbe che gli elettrodi estesi dovessero assicurare una distribuzione uniforme e regolare delle correnti, e quindi una maggiore semplicità nel fenomeno, è invece necessario ricorrere a elettrodi puntiformi per poter risalire agevolmente dalla d.d.p. osservata al coefficiente R. Questo fatto, rilevato dal Corbino, nel 1915, rende poco utilizzabili molte delle esperienze fatte precedentemente, nelle quali si ricorreva appunto alla disposizione della fig. 8.

10. - *Il teorema di reciprocità.*

La teoria della propagazione delle correnti d'una lamina piana isotropa, soggetta a un campo magnetico

Digitized by Google

normale e uniforme, a temperatura costante, ha ricevuto un ampio sviluppo matematico per opera specialmente di Corbino e Volterra: tale teoria è tutta basata sulle equazioni (5) (unitamente alle condizioni supplementari già specificate) le quali furono dedotte dal Corbino in base a una particolare ipotesi corpuscolare sulla natura della corrente elettrica, ma possono anche essere considerate, come noi abbiamo fatto, indipendentemente da ogni ipotesi del genere, come pure equazioni riassuntive di fenomeni osservati. Ha quindi particolare interesse il verificare se effettivamente le conseguenze da esse dedotte sono d'accordo con l'esperienza: la verifica, come già abbiamo visto in alcuni casi particolari, conferma le previsioni.

Un'elegante conseguenza della teoria di cui parliamo è il *teorema di reciprocità* di Volterra, che, nella sua forma più semplice, si può enunciare così:

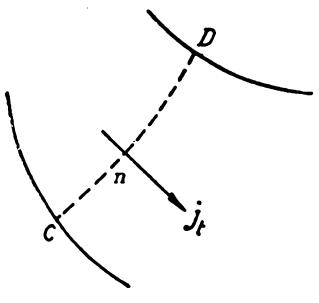


Fig. 10.

La lamina sia munita di due coppie di elettrodi A, B; C, D, estesi o puntiformi (quelli puntiformi possono essere anche interni, quelli estesi sempre al contorno): si faccia passare una corrente I dall'elettrodo A a B, e si misuri la d.d.p. tra C e D: poi si inverta il campo, si faccia passare la stessa corrente I tra C e D, e si misuri la d.d.p. fra A e B. Queste due d.d.p. sono eguali.

Tale teorema è stato esteso dalla Sig.na Freda, sotto certe ipotesi abbastanza generali, al caso di un corpo a tre dimensioni, anche anisotropo, in un campo anche non uniforme, ed è stato confermato dall'esperienza in tutti i casi.

11. - *Lamine anisotrope.*

Tutte le considerazioni precedenti valgono per lamine isotrope. Nel caso di lamine anisotrope, quali si possono ottenere facendo solidificare il metallo, con speciali precauzioni, in grossi cristalli, e ricavando la lamina da uno solo di essi, le equazioni (5) vanno modificate. Accenneremo brevemente al caso più semplice, che la lamina presenti nel suo piano due assi (ortogonali) di simmetria (per es., che sia tagliata da un cristallo uniassico in una direzione qualunque non perpendicolare all'asse) e che scegliendo queste direzioni privilegiate come assi coordinati, le equazioni si scrivano

$$j_x = s_x X - a HY$$
$$j_y = s_y Y + a HX$$

dove s_x, s_y sono le conducibilità nelle due direzioni principali.

Si può allora dimostrare che il problema della distribuzione delle correnti e dei potenziali si riduce a quello analogo per una lamina *isotropa* (lamina immagine) di conducibilità.

$$s = \sqrt{s_x s_y}$$

la cui forma sia ottenuta da quella della lamina data con una dilatazione nel rapporto $\sqrt{a/a_x}$ nella direzione x, e una dilatazione nel rapporto $\sqrt{a/a_y}$ nella direzione y, i cui elettrodi estesi siano mantenuti allo stesso potenziale di quelli della lamina data, mentre dagli elettrodi puntiformi penetra la stessa corrente che in quelli corrispondenti della lamina data. I potenziali delle due lamine in punti corrispondenti risultano allora eguali, e le linee di corrente della lamina anisotropa corrispondono punto per punto a quelle della lamina immagine.

Se ne deduce come corollario che vale anche per lamine anisotrope il teorema di reciprocità, come del resto abbiamo già detto e come è stato verificato sperimentalmente. Inoltre, se ne deduce che le esperienze fatte da taluni Autori per ricercare come vari il coefficiente R col variare della direzione della corrente nella lamina non hanno fondamento teorico poichè tale coefficiente ha un significato intrinseco, indipendente da quella direzione. È invece diverso il valore di R per le diverse orientazioni con cui si può ricavare la lamina dal cristallo, cosicchè R può ritenersi, per un dato cristallo, funzione dei coseni direttori della normale alla lamina.

12. - *L'effetto Hall adiabatico e l'effetto Von Ettingshausen.*

Supponiamo ora che la lamina, anzichè essere mantenuta a tempertura uniforme, sia termicamente isolata dall'ambiente (come si può ottenere praticamente, p. es., circondandola di ovatta) in modo che si stabiliscano liberamente in essa le differenze di temperatura dovute all'effetto Von Ettingshausen e ad altre cause analoghe, (oltre, beninteso, al generale aumento di temperatura provocato dall'effetto Joule che si elimina nel modo indicato al § 5, profittando del fatto che dipende da j^2 e non da j).

In queste condizioni (che si soglion chiamare *adiabatiche*) non solo si manifestano le differenze di temperatura trasversali che costituiscono l'effetto Von Ettingshausen, ma anche l'effetto Hall avviene con legge differente. Inoltre, si osserva una differenza di temperatura (analoga all'effetto Thomson) e una variazione di resistenza elettrica che però, come abbiamo detto al § 5, non rientrano tra i fenomeni di cui ci stiamo occupando.

Tutto ciò può dedursi dalle equazioni generali (1): invece di porvi $T_x = T_y = 0$, dovremo farvi $W_x = W_y = 0$. Si può infatti dimostrare facilmente che, se sono impediti scambi di calore con l'esterno, in una lamina a connessione semplice, non si possono

Digitized by Google

nemmeno avere correnti termiche chiuse su se stesse, (nel caso della lamina anulare invece potrebbero aversi delle correnti termiche circolari. Noi limitiamo le nostre considerazioni al primo caso). Con ciò le due ultime equazioni, risolte rispetto a T_x, T_y, ci forniscono i gradienti di temperatura collegati alle d.d.p. nella lamina, e precisamente (trascurando termini in H^2)

$$(12)\qquad \begin{aligned} T_x &= \frac{\mu}{k} X + \frac{\mu b - k b'}{k^2} H Y \\ T_y &= \frac{\mu}{k} Y - \frac{\mu b - k b'}{k^2} H X \end{aligned}$$

Sostituendo queste espressioni nelle prime due (1), si ha

$$(13)\qquad \begin{cases} j_x = s^* X - a^* H Y \\ j_y = s^* Y + a^* H X \end{cases}$$

dove si è posto

$$(14)\qquad \begin{cases} s^* = s - \dfrac{\lambda \mu}{k} \\ a^* = a + \lambda \dfrac{\mu b - k b'}{k^2} - a' \dfrac{\mu}{k}. \end{cases}$$

Le equazioni (13) sono della stessa forma di quelle (5) trovate per il caso isotermico: è mutato solo il valore dei coefficienti.

Dunque tutta la teoria della propagazione della elettricità nel caso isotermico si trasporta senz'altro al caso adiabatico, sostituendo la conducibilità s con quella che si potrebbe chiamare la *conducibilità elettrica adiabatica* s^*, e il coefficiente a con a^*. In particolare, si verificherà ancora l'effetto Hall, col coefficiente

$$R^* = \frac{a^*}{s^{*2}}$$

(*effetto Hall adiabatico*). Tale coefficiente è stato determinato per il bismuto, e trovato assai vicino a quello isotermico (differenza dell'ordine del 5 %). Infatti i termini che, nella (14), sono aggiunti ad s e ad a, risultano relativamente piccoli.

Per studiare l'effetto Von Ettingshausen, servono le equazioni (12), nelle quali però conviene sostituire per X, Y i valori che si ricavano dalla (13) in funzioni di j_x, j_y. Si ottiene allora, per il gradiente termico

$$(15)\qquad \begin{aligned} T_x &= \frac{\mu}{k s^*} j_x + P H j_y \\ T_y &= \frac{\mu}{k s^*} j_y - P H j_x \end{aligned}$$

dove si è posto

$$P = \frac{\mu}{k} R^* + \frac{\mu b - k b'}{k^2 s^*}$$

ovvero, approssimativamente (sostituendo R^*, s^* con R, s, e notando che

$$\frac{\mu}{k} = T\sigma', \quad \frac{b}{k} = \sim - S$$

(v. § 5 e form. 21 del § 13).

$$(16)\qquad P = T\sigma' \left(R - \frac{S}{s}\right) - \frac{b'}{k s}$$

Il coefficiente P ora definito caratterizza l'effetto Von Ettingshausen: infatti, nel caso di una lamina molto allungata, in cui si possa considerare $j_y = 0$, la seconda delle (15) dà il gradiente trasversale $T_y = - P H j_x$. e quindi, tra i due bordi di una lamina di larghezza b e di spessore ε, la differenza di temperatura è

$$(17)\qquad \Delta T = - P H \frac{I}{b \varepsilon} b = - \frac{P H I}{\varepsilon}$$

È questa la legge sperimentale del fenomeno. Il segno da noi adottato è quello conforme alle usuali convenzioni. Partendo dalle (15), si potrebbe svolgere una teoria più completa del fenomeno, analoga a quella dell'effetto Hall. Per es., si può osservare subito che, nel caso di elettrodi puntiformi, la (17) ha un valore più generale: infatti, presi due punti qualunque C e D su una stessa perpendicolare n alle linee di corrente, la d.d.t. fra di essi è

$$T_D - T_C = \int_C^D (T_x\, dx + T_y\, dy)$$

da cui, sostituendo i valori (15) di T_x e T_y, e osservando che, per essere j normale a ds, si ha $j_x\, dx + j_y\, d_y = 0$,

$$\begin{aligned} T_D - T_C &= P H \int_C^D (j_y\, dx - j_x\, dy) = \\ &= - P H \int_C^D j_n\, ds = - P H \frac{I}{\varepsilon} \end{aligned}$$

dove I è la corrente totale che attraversa, nel verso della freccia, la linea $C\,D$.

13. - *Effetti termomagnetici.*

Gli effetti termomagnetici si hanno, come abbiamo detto, quando la corrente primaria è una corrente termica. Per osservarli in condizioni pure, occorrerebbe quindi render nulla ogni corrente elettrica nella lamina, il che può ottenersi, se la lamina è a connessione semplice, con l'isolarne elettricamente il contorno (oltre, beninteso le due facce). Se la lamina è a connessione multipla, o se in qualche parte della sua superficie avvengono scambi di calore o di elettricità con l'esterno, possono invece stabilirsi, malgrado l'isolamento del contorno, delle correnti elettriche che si chiudono nella lamina stessa, e che, come vedremo, si possono rilevare sperimentalmente.

Consideriamo dunque per ora una lamina semplicemente connessa ed elettricamente isolata, ed ammettiamo che il calore entri ed esca solo da parti del contorno e non dalle facce. Sarà allora dovunque $j_x = j_y = 0$, e la trattazione sarà perfettamente analoga a quella già fatta per gli effetti galvanoma-

Digitized by Google

gnetici adiabatici. Le prime due delle (1) ci danno subito i gradienti elettrici che si stabiliscono in conseguenza di determinati gradienti termici, e precisamente

$$(18)\qquad X = \frac{\lambda}{s} T_x + \frac{\lambda a - s a'}{s^2} H T_y$$
$$Y = \frac{\lambda}{s} T_y - \frac{\lambda a - s a'}{s^2} H T_x$$

Sostituendo nelle altre due, si hanno le seguenti leggi per la conduzione del calore in tali condizioni

$$(19)\qquad W_x = -k^* T_x + b^* H T_y$$
$$W_y = -k^* T_y - b^* H T_x$$

dove si è posto

$$k^* = k - \frac{\lambda \mu}{s}$$
$$l^* = b + \mu \frac{\lambda a - s a'}{s^2} - \frac{b' \lambda}{s}$$

Si ricava dalle (19):

a) La conducibilità termica, in assenza del campo e a corrente elettrica nulla, è k^*, mentre il valore k corrisponde al caso in cui si annulli, con una opportuna corrente elettrica sovrapposta a quella termica, la d.d.t. Thomson. La differenza numerica è naturalmente assai piccola.

b) Nel campo magnetico, a un flusso di calore puramente longitudinale W_x si accompagna un gradiente *termico* trasversale T_y (effetto Righi) che si calcola ponendo nelle (19) $W_y = 0$, ed eliminando T_x. Si ricava

$$(20)\qquad T_y = S H T_x$$

dove

$$(21)\qquad S = -\frac{b^*}{k^*}$$

ovvero approssimamente

$$(21')\qquad S = -\frac{b}{k}$$

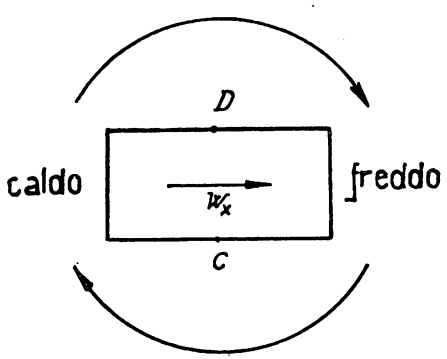


Fig. 11.

Quindi tra i due bordi C e D (fig. 11) di una lamina allungatissima, di larghezza b percorsa da una corrente termica, quindi con un gradiente termico longitudinale T_x, si ha una differenza di temperatura

$$(22)\qquad \Delta T = S H b T_x$$

La formula (22) è data anche dall'esperienza, ed è del tutto analoga a quelle che esprimono l'effetto Hall e l'effetto Von Ettingshausen (form. 9 e 17): l'apparente differenza dipende dal fatto che gli effetti galvanomagnetici si sogliono esprimere in funzione della *corrente* primaria, mentre per quelli termomagnetici si preferisce riferirsi, anzichè alla corrente termica primaria, al corrispondente gradiente di temperatura, che è il dato sperimentale diretto.

c) Nel campo magnetico, al flusso longitudinale di calore si accompagna anche un gradiente *elettrico* trasversale, che si può calcolare dalla seconda delle (18), ponendovi per T_y il valore corrispondente all'effetto Righi, cioè il (20). Si ha allora

$$Y = Q H T x$$

dove si è posto (coefficiente di Nernst)

$$Q = \frac{\lambda}{s} S - \frac{\lambda a - s a'}{s^2}$$

Si avrà quindi tra i punti C e D, detta l la loro distanza, una d.d.p.

$$(23)\qquad V_D - V_C = Q H l T_x$$

ed è questa la legge sperimentale dell'effetto Nernst. Il segno da noi adottato per il coefficiente Q non è quello scelto primitivamente da Nernst, ma è quello che si è convenuto in seguito di adottare, per analogia con l'effetto Hall.

All'espressione di Q si può dare la forma (analoga a quella trovata per P)

$$(24)\qquad Q = -\sigma s \left(R - \frac{S}{s}\right) + \frac{a'}{s}$$

che si ottiene dalla precedente mediante la prima delle (4) e la (8).

14. - *Le esperienze termomagnetiche Corbino.*

Se il calore viene comunicato (o sottratto) alla lamina non dal contorno ma da qualche regione della superficie, potranno aversi linee di corrente chiuse. È questo il caso realizzato dal Corbino, il quale sospendeva un disco di bismuto in un campo magnetico, e ne riscaldava il centro concentrandovi su con una lente un intenso fascio di luce. Il calore si propagava radialmente dal centro verso la periferia, e si disperdeva nell'ambiente parte dal contorno e parte dalle facce. La corrente termica radiale produceva allora, per un effetto collegato all'effetto Nernst, delle correnti elettriche circolari, che si rivelavano col fatto che il disco si comportava come una lamina magnetica, e tendeva quindi a orientarsi nel campo. Lo stesso effetto fu osservato nel tellurio e nell'antimonio.

La teoria del fenomeno si potrebbe ricavare ancora dalle equazioni (1), ponendovi (supposto l'asse x

Digitized by Google

orientato lungo un raggio, e riferendosi a un punto di questo asse)

$$j_x = 0 \qquad Y = 0 \qquad T_y = 0$$

poichè la corrente elettrica radiale è nulla, e sia le equipotenziali che le isoterme debbono necessariamente essere circolari.

Segue dalle prime due (1)

$$0 = s X - \lambda T_x$$
$$j_y = aH X - a' H T_x$$

e quindi, eliminando X

$$j_y = \left(a \frac{\lambda}{s} - a' \right) H T_x$$

relazione, che ci dà la intensità delle correnti circolari, in funzione del gradiente radiale di temperatura. Il coeffiicente, come si vede, non è precisamente lo stesso dell'effetto Nernst.

Le altre due equazioni mostrerebbero che vi è anche un flusso circolare di calore, il quale però non si manifesta sperimentalmente in alcun modo.

15. - *Determinazione sperimentale dei coefficienti degli effetti galvano e termo-magnetici.*

Si possiede una notevole mole di lavori sperimentali diretti alla determinazione dei quattro coefficienti fondamentali R (di Hall), P (di Von Ettingshausen), Q (di Nernst), S (di Righi). Lo scopo di tali ricerche è in generale quello di risalire alla determinazione delle costanti caratteristiche delle varie teorie che sono state proposte per spiegare il meccanismo atomico della conduzione elettrica e termica: ad alcune di queste teorie accenneremo nel seguito.

Ma i risultati numerici sono caratterizzati da notevoli divergenze spesso superiori agli errori sperimentali presunti da ciascun osservatore. Le cause di questo fatto possono essere le seguenti:

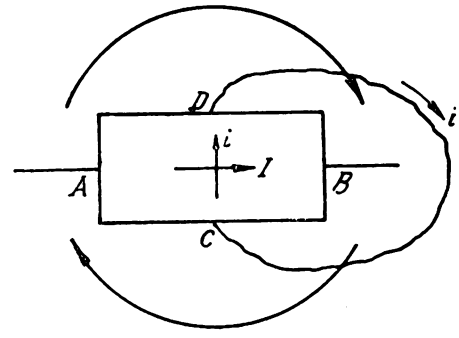
a) I fenomeni studiati sono molto influenzati da caratteristiche accidentali del metallo, principalmente dallo stato di purezza e da quello di cristallizzazione, dovuto alle condizioni in cui è avvenuto il raffreddamento dopo la fusione. I coefficienti dunque differiscono notevolmente da un campione all'altro dello stesso metallo. Ciò avviene sopratutto nei metalli a struttura cristallina relativamente grossa, come il bismuto.

b) Molte esperienze (le più antiche) furono fatte senza una conoscenza completa della teoria fisico-matematica del fenomeno, e quindi non in condizioni tali che si potesse facilmente risalire dalla differenza di potenziale, o di temperatura, osservata al coefficiente richiesto. Esempio tipico, lo studio dell'effetto Hall con elettrodi estesi (V. § 9). Gli effetti termomagnetici poi sono stati studiati quasi sempre facendo entrare e uscire il calore da due interi lati della lamina, cioè in condizioni analoghe a quelle degli elettrodi estesi: si possono quindi ripetere per essi le osservazioni del § 9.

c) Poichè, come abbiamo visto nella trattazione precedente, i vari effetti si presentano in generale sovrapposti e intrecciati tra loro, occorrerebbe ogni volta porsi in condizioni ben determinate (dal punto di vista, per es., dell'isolamento termico in certi casi, della temperatura uniforme in altri) o per lo meno ricondursi a questi casi con opportune correzioni. Solo così i coefficienti R, P, Q, S possono avere un significato; altrimenti quelli che hanno un significato intrinseco sono soltanto gli 8 coefficienti delle equazioni (1). Ma le condizioni per ottenere gli effetti in condizioni di purezza sono spesso difficili da realizzare, e talora gli autori hanno anche trascurato di fare le correzioni necessarie, cosicchè i coefficienti da essi determinati non rappresentano sempre le stesse combinazioni degli 8 coefficienti fondamentali.

16. - *Considerazioni termodinamiche.*

Supponiamo di rilegare tra loro con un filo i due elettrodi secondari C e D di una lamina in cui si verifichi l'effetto Hall, in modo da utilizzare la loro d.d.p. per produrre una corrente i, e quindi ricavarne una potenza che, se la resistenza totale del circuito secondario è g, sarà manifestamente $i^2 g$. Donde proviene questa energia?



Fig, 12.

È facile riconoscere che essa viene fornita dalla corrente primaria la quale, nel passaggio da A a B, fa un lavoro maggiore in presenza del campo che in assenza di questo. E infatti, la corrente secondaria i, attraversando la lamina, produce, per effetto Hall, una d.d.p. tra A e B uguale a $\frac{RHi}{\varepsilon}$, la quale si sovrappone a quella preesistente dovuta al passaggio della corrente primaria I, ed è, si vedrebbe facilmente, diretta nello stesso senso. La corrente I, scendendo questo dislivello supplementare di potenziale, fa un lavoro per unità di tempo

$$(25) \qquad \frac{RHi}{\varepsilon} I$$

Ma si osservi ora che, per la legge di Ohm applicata al circuito secondario,

$$i g = \frac{RHI}{\varepsilon}$$

Digitized by Google

sostituendo nella (25) si ottiene $i^2 g$, cioè proprio l'energia spesa nel circuito secondario. Ne segue che, quando si utilizza la d.d.p. fra C e D dovuta all'effetto Hall per produrre una corrente nel circuito secondario, si deve manifestare un apparente aumento di resistenza nel circuito primario. Questo aumento di resistenza non va, naturalmente, confuso con l'effetto galvanomagnetico longitudinale di cui al § 4, che si manifesta indipendentemente da ogni corrente trasversale.

La lamina Corbino citata al § 8 si può considerare come un caso estremo di questa disposizione: ivi la corrente del circuito secondario si chiude nella lamina stessa, e tutta la d.d.p. dell'effetto Hall è annullata dalla caduta ohmica dovuta a questa corrente (come se tra i punti C e D nella fig. 1, si stabilisse, esternamente alla lamina, un corto circuito). Si intuisce allora che in tali condizioni debba aversi il massimo aumento di resistenza apparente tra i due elettrodi anulari. Precisando quantitativamente queste considerazioni il Corbino giunse alla conclusione che tale resistenza deve aumentare nel rapporto di $\frac{r_H}{r_0}(1 + \mathrm{tg}^2 \beta)$, dove $\frac{r_H}{r_0}$ è il fattore rappresentante l'aumento di resistenza dovuto all'effetto longitudinale (cioè quello che si osserverebbe in una lamina a elettrodi puntiformi). Questa previsione è stata confermata esattissimamente dalle esperienze del Trabacchi.

Altre considerazioni termodinamiche — basate però, oltre che sui principi della termodinamica, su ipotesi complementari meno attendibili — hanno condotto a trovare alcune relazioni tra i coefficienti delle nostre equazioni (1). Per es. con ragionamenti che omettiamo, si trovano le relazioni

$$\mu = -\lambda T$$
$$b' = a' T$$

(dove T è la temperatura assoluta) da cui si deduce, rammentando le (4), la seguente relazione tra i due coefficienti Thomson σ, σ'

$$(26) \qquad \sigma' = -\sigma \frac{s}{k}$$

e, rammentando le espressioni (16) e (24) dei coefficienti di Von Ettingshausen e Nernst

$$(27) \qquad P = \frac{Q T}{k}$$

Questa relazione trovata da Bridgman, e indipendentemente da Lorentz, sembra (entro i limiti dell'errore sperimentale) confermata dall'esperienza.

17. - *Teoria elettronica semplice della conduzione metallica.*

Nei §§ precedenti ci siamo occupati soltanto di descrivere i fenomeni della conduzione elettrica e termica e collegarli tra loro termodinamicamente, senza indagare la loro intima natura: ci proponiamo ora di esporre succintamente le più importanti teorie proposte riguardo a questa natura, la quale appare oggidì più complessa di quanto non si ritenesse dapprima.

Se si osserva che i metalli sono tutti elementi fortemente elettropositivi (i cui atomi cioè si trasformano assai facilmente in ioni positivi, per la perdita di un elettrone) e che da essi si possono estrarre elettroni liberi, come mostrano i fenomeni fotoelettrici e termoionici, si è indotti a ritenere che nell'interno dei metalli possano esservi degli elettroni staccatisi spontaneamente dagli atomi e vaganti liberamente, o quasi, negli spazi intra atomici, e che a questi elettroni debbano attribuirsi la conduzione elettrica e quella termica.

Secondo questa teoria gli elettroni costituirebbero come un gas e le loro velocità sarebbero dirette (in assenza di campo elettrico) disordinatamente in tutte le direzioni, mentre gli ioni positivi e gli eventuali atomi neutri resterebbero praticamente fermi, oscillando intorno alle loro posizioni di equilibrio. Anzi, l'analogia col gas fu ritenuta così completa, che da Drude in poi si attribuì agli elettroni la forza viva media d'agitazione termica caratteristica della legge dell'equipartizione dell'energia cioè αT (essendo α una costante universale uguale a $2{,}02 \cdot 10^{-16}$ in unità CGS, e T la temperatura assoluta) e più tardi il Lorentz giunse a tener conto della legge statistica di distribuzione delle velocità tra i vari elettroni liberi, che identificò con la legge di Maxwell. Se interviene un campo elettrico a orientare parzialmente verso una data direzione il disordinato moto degli elettroni, si sovrappone al moto termico uno spostamento d'insieme che equivale a una corrente elettrica in senso contrario. Naturalmente per i frequentissimi urti degli elettroni contro i nuclei fissi, la corrente elettronica incontra una specie di attrito, il quale fa sì che il moto d'insieme non sia accelerato ma uniforme, con velocità proporzionale al campo (legge di Ohm). Questi urti, comunicando forza viva ai nuclei fissi, ne aumentano l'energia oscillatoria, la quale si manifesta come calore (legge di Joule).

Quanto al trasporto di calore, esso avrebbe un meccanismo analogo a quello che si verifica nei gas: quando fra due punti A, B del metallo vi è differenza di temperatura, gli elettroni che passano da A a B (supposto che A sia più caldo) hanno in media una forza viva maggiore di quelli che passano da B in A; quindi, anche se essi sono in egual numero (corrente elettrica nulla) vi è passaggio di energia, cioè di calore, da A a B. Applicando le leggi della teoria cinetica dei gas si giunge a prevedere quantitativamente questi fenomeni, e, se si suppone che il numero di elettroni liberi sia indipendente dalla temperatura, si arriva alla legge di Wiedemann e Franz

$$\frac{\text{cond. termica}}{\text{cond. elettrica}} = \text{cost.} \times T$$

che è approssimativamente verificata dall'esperienza.

Maggior accordo, in questo e in altri fenomeni, si ottiene supponendo che il numero di elettroni sia funzione della temperatura e assimilando gli elettroni non a un gas ordinario, ma a un gas occluso in un corpo poroso.

Digitized by Google

Ma vediamo ora come si comporta questa teoria nei riguardi dell'effetto Hall. Nel caso della fig. 13,

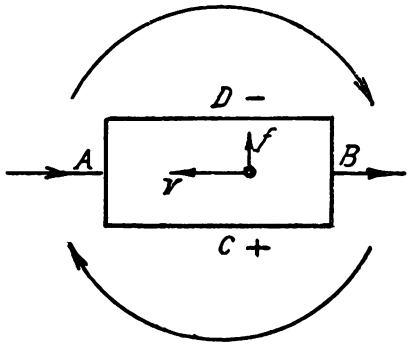


Fig. 13.

in cui la corrente I va da A a B, e il campo magnetico è diretto verso il foglio, gli elettroni, la cui velocità v è diretta da B verso A, subiscono, per effetto del campo magnetico una forza $f = e\,v \wedge H$ che risulta diretta verso l'alto (e, carica dell'elettrone, < 0) essi quindi si addenseranno nella parte D della lamina, generandovi una carica negativa (mentre in C resteranno in prevalenza le cariche positive fisse): queste cariche laterali andranno accumulandosi finchè la loro azione elettrostatica sugli elettroni non compensa la forza f, il che avverrà quando il campo elettrico trasversale Y è tale che $eY = evH$, ossia

$$Y = v\,H.$$

Poichè v è legata alla densità di corrente dalla ovvia relazione

$$j = n\,v\,e$$

(n numero di elettroni liberi per cc.) si ha

$$Y = \frac{1}{n\,e}\,j\,H$$

e quindi il coefficiente di Hall sarà (cfr. form. 9')

$$R = \frac{1}{n\,e}$$

Il potenziale in D sarà più basso che in C : l'opposto cioè della fig. 1. Il coefficiente R risulterebbe dunque sempre *negativo* (V. § 7) mentre, come sappiamo, per molti metalli R è positivo.

La teoria elettronica semplice (cioè quella che assimila gli elettroni ad un gas) è dunque in manifesto disaccordo con l'esperienza. Solo per l'argento, il rame e l'oro essa, opportunamente sviluppata, prevede tutti gli effetti termo e galvanomagnetici col segno e l'ordine di grandezza che in realtà si osservano.

18. - *Teoria dualistica.*

Per rendere ragione del diverso segno dell'effetto Hall nei vari metalli, il Riecke ha emesso l'ipotesi (sviluppata in seguito da Drude, Corbino e altri), che esistano nel metallo, oltre gli elettroni, anche delle particelle positive libere, costituenti come un' altro gas frammisto a quello formato dagli elettroni. La conduzione elettrica avverrebbe così con un meccanismo analogo a quello della conduzione elettrolitica : gli ioni positivi si muovono nel senso della corrente, quelli negativi nel senso opposto, ma i loro contributi all'intensità della corrente si sommano, a causa del diverso segno delle cariche in moto.

Il ragionamento del § precedente applicato agli ioni positivi (fig. 14) mostra che tendono anche

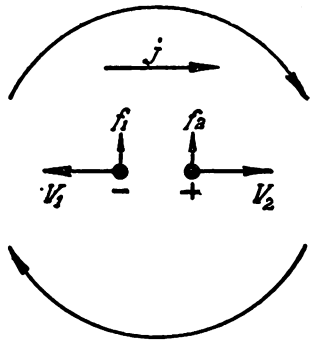


Fig. 14.

essi ad accumularsi in D (poichè hanno bensì velocità opposta agli elettroni, ma anche la loro carica è di segno contrario, cosicchè in definitiva la forza f derivante dal campo magnetico agisce su entrambi nello stesso senso). Gli ioni positivi dunque tendono a produrre un effetto Hall positivo. Se ora si suppone (come è plausibile) che le due specie di ioni differiscano non solo per la massa, ma anche per la mobilità (velocità che acquistano sollecitati da una forza unitaria) e che siano in diverso numero, si prevede che possano prevalere, nell'effetto Hall, gli uni o gli altri e quindi R possa risultare così positivo come negativo.

Il Drude ha aggiunto l' ipotesi che le concentrazioni delle due specie di ioni siano funzioni della temperatura. In questo modo è stata sviluppata una teoria completa della conduzione termica ed elettrica, con o senza campo magnetico, e si è giunti ad esprimere tutti i coefficienti delle equazioni (1), e quindi anche le conducibilità e i coefficienti degli effetti fondamentali R, P, Q, S, mediante le « costanti elettroniche del metallo », cioè le mobilità delle due specie di ioni, le loro concentrazioni, e le rispettive derivate rispetto alla temperatura. Questa teoria, nella sua forma più completa, prevede anche i fenomeni che dipendono dal quadrato del campo, cioè gli effetti longitudinali, e la parte quadratica di quelli trasversali.

Si può dunque teoricamente, da una misura accurata dei coefficienti dei diversi effetti, risalire alla determinazione delle costanti elettroniche del metallo ; anzi, poichè queste sono in minor numero di quelli, si hanno vari controlli che permettono di verificar la teoria. In pratica la cosa presenta notevoli difficoltà ; le misure debbono essere condotte con grande accuratezza, e tutte sullo stesso campione (per la ragione accennata al § 15). Tuttavia anche con queste precauzioni, non si riesce a trovare valori tali per le costanti elettroniche, che tutti i fenomeni

Digitized by Google

della conduzione risultino quantitativamente spiegati.

La prima serie di misure fatte con questo intendimento è dovuta a Zahn (1904) ma condusse per tutti i metalli studiati a risultati assurdi, come mobilità negative. Nel 1914 il Senepa, rifacendo le esperienze con nuovi criteri e servendosi delle considerazioni teoriche del Corbino determinò (sempre in base alla teoria dualistica) le costanti del bismuto, ottenendo per il primo dei risultati plausibili, che sono (in unità C G S):

pos.

conc. $N_1 = 0{,}24 \cdot 10^{18}$ (err. mass. 60 %)
mob. $u_1 = 1{,}57 \cdot 10^{15}$ (err. mass. 60 %)

neg.

conc. $N_2 = 8{,}02 \cdot 10^{18}$ (err. mass. 1 %)
mob. $u_2 = 3{,}75 \cdot 10^{15}$ (err. mass. 1%)

Egli dovette però scartare l'effetto Righi, il quale risultava incompatibile con la teoria non solo come entità ma anche come senso. I valori precedenti hanno ricevuto conferma (come ordine di grandezza) dalle sperienze successive del Trabacchi (1918), il quale, servendosi solo di fenomeni del secondo ordine (cioè dipendenti da H^2) quali le variazioni di R e della conducibilità col crescere del campo, giunse, pel bismuto ai valori

$$N_1 = 0{,}5 \cdot 10^{18} \qquad N_2 = 1{,}8 \cdot 10^{18}$$
$$u_1 = 5{,}4 \cdot 10^{15} \qquad u_2 = 15{,}6 \cdot 10^{15}$$

Misurando poi la variazione di queste costanti con la temperatura egli potè ricavare una previsione, per lo scarto della legge di Wiedemann e Franz, in perfetto accordo con l'esperienza.

Da quanto precede si conclude che la teoria dualistica può, fino a un certo punto, rendere conto dei fatti osservati, ma se si pensa, d'altra parte, che l'ipotesi della presenza di particelle positive libere nei metalli non trova conferma in nessun altro campo della fisica, si riconosce che anche questa teoria, utile come ipotesi di lavoro, debba essere tuttora lontana dalla realtà.

19. - *Vedute moderne sulla conduzione metallica.*

Gli insuccessi delle teorie precedenti, da un lato, e dall'altro le notizie che da vari campi della fisica sono state in questi ultimi anni raccolte intorno alla costituzione della materia, inducono a ritenere che le particelle trasportanti la corrente elettrica nei metalli siano soltanto elettroni, ma che questi non si trovino in condizioni paragonabili a quelle di un gas, sia pure occluso in un corpo poroso. Le differenze consistono essenzialmente in questo:

1. Negli spazi interposti tra gli ioni positivi regnano forze coulombiane notevoli, cosicchè gli elettroni non sono mai liberi, ma sempre soggetti all'azione di uno o più centri positivi vicini. Non si può quindi parlare di un vero cammino libero, nè applicare le leggi dei gas.

2. Il moto degli elettroni in questo campo non è soggetto alle leggi della meccanica classica, ma a quelle della teoria dei quanti.

Uno sviluppo completo di questa teoria presenta difficoltà per ora insormontabili; tuttavia Frenkel è riuscito a mostrare che la teoria contiene gli elementi per un calcolo delle conducibilità elettrica e termica, il quale conduce agli ordini di grandezza giusti, e si accorda con la legge sperimentale di Wiedemann e Franz.

Consideriamo dapprima un metallo monovalente allo stato di vapore: ogni atomo si può considerare come un sistema meccanico isolato, costituito da uno ione positivo intorno al quale circola, in un'orbita elittica o circolare, un elettrone. Quando il vapore passa allo stato solido, i nuclei positivi si dispongono in forma di reticolo regolare come ci è noto dalle classiche esperienze di diffrazione dei raggi X, e la loro mutua distanza è dello stesso ordine di grandezza della distanza tra elettrone e nucleo: anzi, nei metalli monovalenti risulta più piccola del valore massimo di questa distanza, cioè della distanza afelica dell'orbita. Ne segue che quasi a ogni giro l'elettrone ruotante intorno a un nucleo passerà abbastanza vicino ad un altro nucleo per venirne catturato, e così la sua orbita, anzichè essere chiusa intorno a un determinato nucleo, sarà una linea intricatissima che si avvolge intorno a vari nuclei, girando intorno a ciascuno di essi in media una sola volta. Questo moto, come si vede, non ha nulla a che fare con quello delle molecole di un gas, ma si deve piuttosto considerare come una forma complicatissima di movimento orbitale, retto dalle stesse leggi quantistiche che determinano il moto degli elettroni nell'atomo isolato; soltanto, queste leggi, nel caso in cui il campo è quello dovuto non ad un solo, ma a parecchi centri positivi fissi, debbono assumere una forma più generale, non ancora nota con sicurezza. Si aggiunga che i centri positivi non sono veramente fissi, ma oscillano intorno alle loro posizioni di equilibrio in conseguenza della agitazione termica, e trasmettono in certo modo questo movimento agli elettroni che si trovano momentaneamente a dipender da essi.

Per i metalli polivalenti, nei quali le orbite elettroniche sono più piccole, i passaggi di un elettrone da un atomo all'altro sono meno frequenti, ogni elettrone compiendo in media diversi giri intorno allo stesso nucleo prima che la rotazione del perielio, o l'agitazione termica, lo porti nella sfera d'azione di un nucleo vicino. Ne segue una minor conducibilità atomica, che infatti si verifica.

Per rendersi conto della differenza tra questo modello, e quello che assimila gli elettroni ad un gas, si pensi che, mentre in questo ultimo caso la loro energia cinetica dovrebbe essere eguale ad $\propto T$, cioè, a temperatura ordinaria, corrispondere a circa 0,04 volta, l'energia dei moti orbitali è invece dell'ordine di qualche volta; la velocità degli elettroni è perciò, secondo le vedute di Frenkel, circa dieci volte più grande che nelle antiche teorie. Inoltre non vi è più ragione per cui l'energia cinetica debba essere proporzionale ad $\propto T$, nè si può parlare di distribuzione maxwelliana delle velocità.

Digitized by Google

Concepita in tal modo la struttura del metallo, si comprende come un campo elettrico, facilitando i passaggi di elettroni da un atomo all'altro in una direzione determinata, debba sovrapporre alla agitazione disordinata che abbiamo descritto un movimento d' insieme, che costituisce la corrente elettrica. Quanto alla conduzione termica, essa deve dipendere dal fatto che, quando un elettrone passa da un nucleo avente una certa energia di oscillazione a un altro che l' ha minore, comunica al secondo una parte dell'energia del primo, stabilendo, per così dire, un istantaneo legame meccanico tra i due nell' istante in cui lascia il primo per passare al secondo. Così l'energia cinetica di oscillazione dei nuclei, cioè il calore, passa dalle parti più calde a quelle più fredde del metallo.

Questa teoria, come abbiamo detto, non è ancora suscettibile di una precisazione quantitativa (salvo per gli ordini di grandezza) nemmeno per i fenomeni della semplice conduzione: si è quindi ancora lontani dall' inquadrare in essa i fenomeni galvano e termo-magnetici. Il vasto materiale sperimentale da questi rappresentato costituisce dunque una riserva di stretti e variati controlli con cui dovrà cimentarsi la teoria, il giorno in cui si riuscirà a calcolare il funzionamento di quel meccanismo di cui oggi, per molteplici indizi, conosciamo soltanto qualitativamente la struttura.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. MICHELE CANTONE

ISTITUTO FISICO R. UNIVERSITÀ DI NAPOLI

SULLE AZIONI MAGNETOELASTICHE

Digitized by Google

Digitized by Google

1. - Fin da quando Maxwell diede forma matematica alla concezione geniale di Faraday sulla sede vera dell'energia cui sono dovute le manifestazioni del campo elettrico e del campo magnetico, individuando le grandezze delle tensioni lungo le linee di forza e delle pressioni in senso trasversale nei mezzi polarizzati in guisa da risultarne una teoria completa dal punto di vista energetico, si vide che la trattazione del problema non rispondeva ad una reale interpretazione delle proprietà degli enti fisici alle quali avrebbe dovuto far capo un processo sperimentale di verifica, e perchè l'etere cosmico, riconosciuto anche dal Maxwell indispensabile fattore per le azioni elettromagnetiche, non consente la costatazione di effetti che potrebbero servire a precisare la natura di questo mezzo, e perchè nulla era detto nella teoria del fisico inglese sopra un meccanismo effettivo mediante il quale, secondo i concetti ordinari della meccanica e della elasticità, si esercitasse l'influenza della materia ponderabile ; nè i tentativi dei fisici matematici per raggiungere tale scopo riuscirono a portare luce, in questa parte, sull'opera grandiosa del Maxwell, se non dimostrare che il di lui sistema di tensioni era irrealizzabile nelle applicazioni allo studio delle deformazioni elastiche nei mezzi atti a polarizzarsi, sicchè restava una interpretazione puramente formale nella traduzione in termini quantitativi della teoria concettuale di Faraday. Si sentiva pertanto il bisogno di nuovi indirizzi teorici che dessero norme sicure nelle indagini intese a vedere se i semplici concetti forniti dalla meccanica e dalla teoria dell'elasticità, con le conoscenze derivanti dalle leggi fondamentali di Coulomb, bastassero a dare una spiegazione dei fenomeni offerti dai mezzi polarizzati elettricamente o magneticamente senza che fosse necessario introdurre nuovi concetti per rintracciare eventuali deficienze delle dottrine poste a base della fisica. A tale compito si sono dedicati numerosi fisici teorici e sperimentali, ed in questa rassegna sommaria si procurerà di dare un'idea generale degli studi compiuti sulle azioni magnetoelastiche, le quali, rispetto a quelle analoghe per i mezzi polarizzati elettricamente, danno luogo a maggiori difficoltà abbracciando un assai più esteso ordine di fenomeni.

2. - Nella trattazione delle forze dovute al campo magnetico è bene anzitutto rilevare che lo studio dell'induzione magnetica (effetto immediato di tali forze) risente in certo modo l'influenza derivante dai limitati mezzi di eccitazione e di misura disponibili nelle primitive ricerche. Certamente oggi si parla della suscettività magnetica nel senso che sia questa da considerare come funzione del campo, ed anzi si cerca di precisare le proprietà dei materiali ferromagnetici per il magnetismo indotto mediante i noti diagrammi dell'intensità in funzione del campo, ma non può negarsi che dal punto di vista analitico s'impostano d'ordinario i problemi partendo dalla relazione $I = k\,H$, la quale implica la nozione di un coefficiente medio k privo di significato fisico di carattere assoluto, ed indeterminato per la legge della sua variazione fino a quando non sia noto come varia I in funzione di H. In ciò risiede uno dei tanti pregiudizi che si perpetuano in fisica quando non si trovi una facile via da seguire ; ma bisogna allora accogliere i risultati con moderata fiducia, a meno che non ci si voglia contentare di quelli che si riferiscono a valori piccoli del campo (dato che gli effetti si mantengano apprezzabili fino a tal limite), perchè solo per piccoli valori di H può ammettersi una legge di proporzionalità fra I ed H nelle sostanze ferromagnetiche. Nè è il caso di ricorrere al coefficiente differenziale $\frac{dI}{dH}$, per il fatto che in generale nei fenomeni magnetici, ed in modo speciale in quelli magnetoelastici che dovremo esaminare, è insito il carattere di ereditarietà per cui le azioni relative ad un certo stato risentono l'effetto degli stati preesistenti, come attestano in modo evidentissimo gli effetti d'isteresi e quelli di accomodazione. E poichè parliamo di azioni magnetoelastiche, non si dovrebbe prescindere dalle complicazioni che derivano dalle analoghe imperfezioni elastiche, se non che le deformazioni prodotte dalle forze magnetiche sono solitamente assai piccole per generare effetti notevoli d'isteresi elastica, e quelle che si fanno intervenire per provocare l'influenza sullo stato magnetico possono essere contenute entro limiti non molto estesi se voglionsi ritrarre i caratteri fondamentali dei fenomeni anzidetti.

3. - Il problema della ricerca teorica delle deformazioni prodotte dalla polarizzazione fu trattato in principio riferendosi esclusivamente all'azione delle forze elettriche o magnetiche e supponendo non

Digitized by Google

variabile il coefficiente k di suscettività per effetto delle deformazioni. Si passò poi dal Korteweg (1) allo studio di una *elettrostrizione di seconda specie* tenendo conto della variabilità, ed il metodo stesso, con procedimento energetico, fu poco dopo sviluppato da Helmkoltz (2) il quale considerò una variazione di k dipendentemente dalla dilatazione cubica che subisce il corpo sottoposto ad induzione, avendo avuto egli di mira le applicazioni ai fluidi.

Passando allo studio relativo ai solidi si pensò che, essendovi nei mezzi polarizzati nette indicazioni ottiche di anisotropia derivante in modo diretto dalle forze elettriche o magnetiche, non fosse ammissibile lo stesso comportamento della sostanza nelle varie direzioni del mezzo eccitato, onde, in conformità del concetto fondamentale della teoria di Maxwell, il Kirchkoff (3) nel magistrale lavoro sulle deformazioni prodotte dal campo magnetico ammise una legge diversa di variabilità di k per la dilatazione longitudinale e per la trasversale rispetto alle linee di forza ponendo

$$k = k_0 - k' \sigma - k'' \lambda, \qquad (1)$$

dove si denota con k_0 la suscettività ordinaria e con k', k'' rispettivamente i rapporti tra le variazioni di k e le corrispondenti contrazioni cubica (σ) e lineare (λ) nel senso della forza elettrica o magnetica: e ricorrendo al principio di conservazione dell'energia trovò le relazioni generali cui si deve soddisfare, donde venne in ultimo all'applicazione al caso di una sfera di sostanza magnetica.

In seguito il problema fu risolto in modo più conveniente dal lato sperimentale (4) per la circostanza che non presenta notevoli difficoltà dal punto di vista teorico il passaggio dal caso di una sfera a quello di un ellissoide di rivoluzione, potendosi estendere alla forma generale ellissoidica la proprietà di assumersi dal corpo in un campo uniforme magnetismo indotto del pari uniforme, e perciò, allo scopo di aversi con masse non grandi valori facilmente apprezzabili dell'intensità di magnetizzazione e delle variazioni di lunghezza, senza venir meno al rigore è lecito sperimentare con ellissoidi allungati. Vi è soltanto lo svantaggio di non potere sottoporre i campioni a sforzi di tensione; ma ci si deve contentare allora di una soluzione non rigorosa nei problemi di *magnetostrizione*; e del resto non si commette grave errore perchè nel caso di fili lunghissimi rispetto al diametro la forma può riguardarsi quella di un ellissoide a grande eccentricità.

Rimane per questo genere di ricerche l'inconveniente essenziale che proviene dalla variabilità di k_0, perchè, se nella teoria si tien conto delle variazioni della suscettività k dovute alle deformazioni, si ammette invece in modo implicito che k_0 non dipenda dalla forza magnetizzante, cosa contraria alla realtà quando si abbia da fare con sostanze ferromagnetiche, a meno di non limitare lo studio sottoponendosi alla condizione di valutare effetti estremamente piccoli per le verifiche sperimentali.

Volendo avere un'idea dell'ordine di grandezza dei coefficienti di k' k'' introdotti dal Kirchhoff si è scelta pertanto una via di mezzo ricorrendo ad intensità non elevate del campo ed assumendo caso per caso i rispettivi valori della suscettività magnetica media. Si trovarono in tal modo, per i valori del campo esterno H qui appresso registrati, quelli corrispondenti delle suscettività, delle dilatazioni cubica e lineare e delle variazioni Δk espresse da $-k'\sigma - k''\lambda$.

	H	k	$\frac{\Delta V}{V}$	$\frac{\Delta L}{L}$	k'	k''	Δk
Ferro	22	56	—	$2{,}2\times10^{-7}$	$4{,}4\times10^{4}$	$-9{,}2\times10^{4}$	0,020
	37	58	—	$5{,}9\times10^{-7}$	$4{,}6\times10^{4}$	$-9{,}7\times10^{4}$	0,057
	51	62	—	$8{,}3\times10^{-7}$	$3{,}9\times10^{4}$	$-7{,}0\times10^{4}$	0,058
Nichel	22	33	$0{,}5\times10^{-7}$	-32×10^{-7}	-26×10^{4}	79×10^{4}	2,5
	37	29	$1{,}1\times10^{-7}$	-83×10^{-7}	-16×10^{4}	47×10^{4}	3,8
	51	29	$1{,}6\times10^{-7}$	-151×10^{-7}	-12×10^{4}	38×10^{4}	5,6

Qui non si tratta che di apprezzamenti grossolani; ed in verità i risultati ottenuti poi da Nagaoka e Honda e da altri sperimentatori mettono in evidenza divari notevoli in quest'ordine di deduzioni, e fra l'altro una dilatazione cubica positiva, riscontrata dai fisici giapponesi, la quale però non avrebbe carattere decisivo nel giudizio generale perchè la dilatazione cubica è quasi sempre assai piccola rispetto a quella in direzione delle linee di forza. Ad ogni modo, per quanto riguarda appunto il giudizio complessivo, è da rilevare che, nonostante le divergenze cui porta la natura stessa della teoria ed in parte anche la diversità del materiale sottoposto ad esperimento, per mezzo dei segni da cui sono affetti i valori di k' e k'' rimane assodata l'esistenza di effetti di magnetostrizione in sensi opposti per il nichel ed il ferro, fatto di non poco interesse qualora lo si ponga in rapporto con altre contrastanti manifestazioni cui essi metalli danno luogo nello stato magnetico.

4. - Ma a giudicare del comportamento reale dei metalli anzidetti, lasciando da parte una teoria che in realtà porta il vizio di origine di uno studio di carattere differenziale sulla base di un coefficiente medio k che male ritrae, con un falso concetto d'integrazione, la legge del magnetismo indotto, sarà bene riportarsi anzitutto ai risultati genuini delle esperienze prescindendo in principio da considerazioni d'indole teorica. E mi limito in questa sommaria esposizione al nichel ed al ferro, sia perchè si tratta dei metalli meglio studiati, sia perchè in un problema così complesso quale è quello dell'azione del magnetismo non si può in breve spazio abbracciare in una volta gli effetti dovuti al campo magnetico nei metalli ferromagnetici e nelle loro leghe, nè si può agevolmente spingere le indagini in modo sistematico sul comportamento del cobalto per il quale, oltre alla difficoltà di poterlo procurare esente da nichel, s'incontra l'altra derivante dall'aversi effetti

(1) Wied Ann. Vol. 9, p. 48.
(2) Wied Ann. Vol. 13, p. 300.
(3) Wied Ann. Vol. 24, p, 52; Vol. 25, p. 601.
(4) M. CANTONE, *Mem: Acc. dei Lincei*, Ann. 286, 1889: *Rend. Acc. dei Lincei*, Vol. 6, 1° Sem., p. 252, 1890.

Digitized by Google

notevoli in sensi opposti sol che si passi dal metallo ottenuto per semplice fusione al medesimo campione ricotto (1).

Gli annessi diagrammi mostrano, non solo gli effetti di magnetostrizione nel ferro e nel nichel, ma le rispettive variazioni al variare del peso tensore, secondo risulta dalle esperienze di Bidwell dopo quelle fondamentali di Joule e di Righi; ed è opportuno che si abbia in una volta un quadro dei vari diagrammi, e per ritrarre sotto l'aspetto più generale l'andamento dei fenomeni magnetoelastici che si manifestano nei fili con variazioni di lunghezza, e per mostrare come si possono ottenere le dilatazioni corrispondenti a determinati valori del

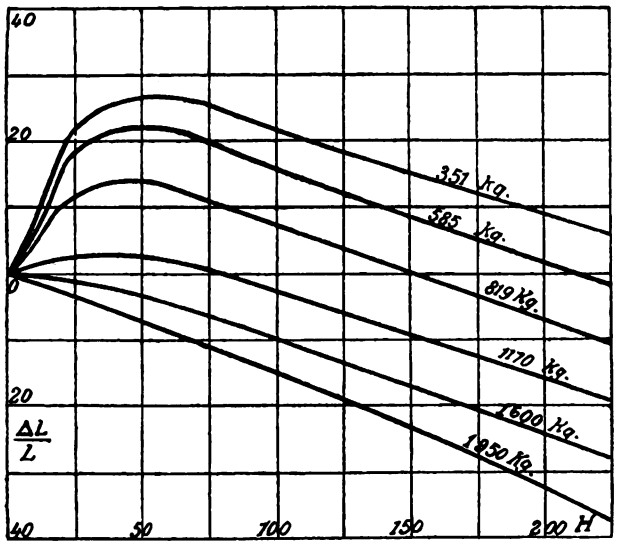


Fig. 1.

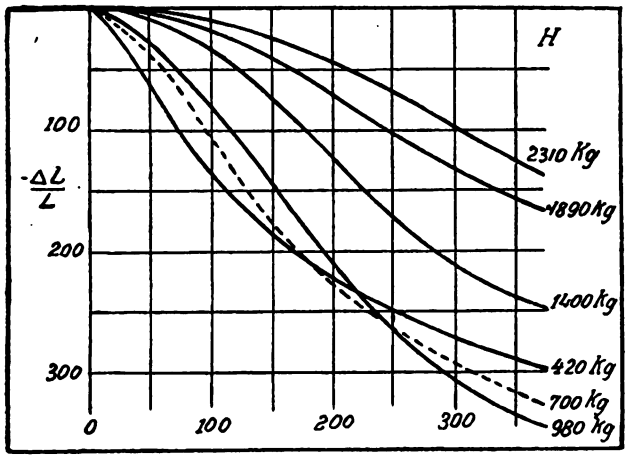


Fig. 2.

campo magnetico H e delle tensioni p, e cioè gli elementi utili per la verifica che faremo in seguito di nuove deduzioni teoriche.

Il comportamento speciale del ferro nella prima fase della magnetizzazione, per cui si hanno aumenti di lunghezza fino ad un massimo, si rende sempre meno accentuato a misura che cresce il peso tensore, e diminuisce nel tempo stesso l'estensione del campo magnetico cui corrispondono le dilatazioni positive, sicchè con una tensione di circa 1500 kg. per cmq. arriviamo in fine agli effetti del tipo caratteristico del nichel, vale a dire a continui decrementi di lunghezza a partire dal campo nullo. Resta però il contrasto ove non si arrivi a questo limite, ed è notevole che ciò si verifichi per campi deboli, per i quali la suscettività piccola del ferro indurrebbe a pensare ad una uniformità di comportamento col nichel; ma uno sguardo ai diagrammi relativi a questo metallo, per il fatto che col crescere del peso tensore le curve pure innalzandosi restano sempre al disotto dell'asse delle H, fa acquistare il convincimento che vi sia nella struttura interna di queste sostanze qualche speciale fattore di differenziazione per gli effetti delle forze magnetiche.

Oltre agli effetti longitudinali di variazione di lunghezza per intervento del campo magnetico, sono da considerare quelle trasversali rispetto alle linee di forza. Le ricerche istituite al riguardo da Nagaoka e Honda (1) e quelle più estese di Williams (2) hanno permesso di assodare che esistono in generale variazioni in senso opposto a quelle relative agli effetti longitudinali, ma in misura alquanto attenuata e con legge diversa, onde, mentre per il nichel la magnetostrizione trasversale si rivela con allungamenti che crescono col campo ed in misura meno elevata che per la direzione longitudinale, per il ferro al variare del campo si manifestano contrazioni più piccole delle corrispondenti dilatazioni longitudinali nella prima fase della magnetizzazione, e poi contrazioni, ma a partire da un campo magnetico parimenti ridotto.

Il confronto particolareggiato di questi effetti presenta grande interesse, specialmente per lo studio teorico dell'effetto Wiedemann di cui ci occuperemo appresso: diciamo solo per ora che dalla coesistenza dei particolari esposti risultano dilatazioni cubiche assai piccole ma non sempre trascurabili (3).

Naturalmente parlando di influenze esercitate dal campo magnetico su metalli dotati di alta suscettività non si possono trascurare le manifestazioni d'isteresi e precisamente di quella di carattere magnetico, perchè interviene in misura attenuata la isteresi elastica a causa della piccolezza delle deformazioni. Ma deve notarsi che in riguardo alla magnetostrizione gli effetti d'isteresi sono nel nichel assai piccoli; ed anzi spariscono se, invece di rappresentare gli accorciamenti in funzione del campo, si assumono sull'asse delle ascisse segmenti proporzionali alle intensità di magnetizzazione, la qual cosa starebbe ad indicare che le deformazioni, almeno nel nichel, dipendono in modo diretto dalle condizioni interne dello stato magnetico. Risultati meno semplici si hanno per il ferro, probabilmente per quelle stesse condizioni di struttura che determinano una grande suscettività.

(1) Una esposizione abbastanza particolareggiata degli effetti di magnetostrizione si trova in Handbuch der Elektrizität und des Magnetismus *del Graetz.*

(1) *Phil. Mag.*, Vol. 46, p. 261, 1898.
(2) *Phys. Rev.*, Vol 32 p. 281 (1911); Vol. 4, p. 498, 1914; Vol. 10 p. 127, 1917.
(3) *V. Fromy, Journal de Physique*, Vol. 1, pag. 13, 1926.

Digitized by Google

5. - In istretto rapporto con le variazioni di lunghezza dovute alle forze magnetiche stanno i fenomeni di variazione dell'intensità magnetica al variare del peso tensore o comprimente. Le prime indagini in siffatto indirizzo si devono al Matteucci il quale trovò che nel caso del ferro cresce l'intensità magnetica collo stiramento; ma si deve al Villari (1) lo studio sistematico delle magnetizzazioni di fili sottoposti all'azione di forze elastiche di tensione e la scoperta dell'esistenza di un campo particolare, detto poi *punto critico del Villari*, per il quale si passa da un incremento ad una diminuzione dell'intensità per l'influenza della tensione elastica nei fili assoggettati ad induzione. Lo studio fu poi ripreso da W. Thomson (2) in occasione di ricerche dalle quali risultava che gli effetti di tensioni longitudinali e trasversali su fili di acciaio nel campo magnetico erano in sensi opposti, e venne esteso al nichel ed al cobalto. Ma i risultati più importanti per un esame accurato dei fenomeni magnetoelastici nel nuovo indirizzo, e per mettere in evidenza la reciprocità coi fenomeni delle deformazioni prodotte dalle forze magnetiche si ebbero da Ewing e dai suoi allievi. Si riportano qui alcuni diagrammi nei quali ciascuna curva porta indicato il carico tensore costante, e che mostrano come varia la legge di magnetizzazione del nichel e del ferro in esperienze del genere di quelle che portarono alla scoperta del punto critico del Villari.

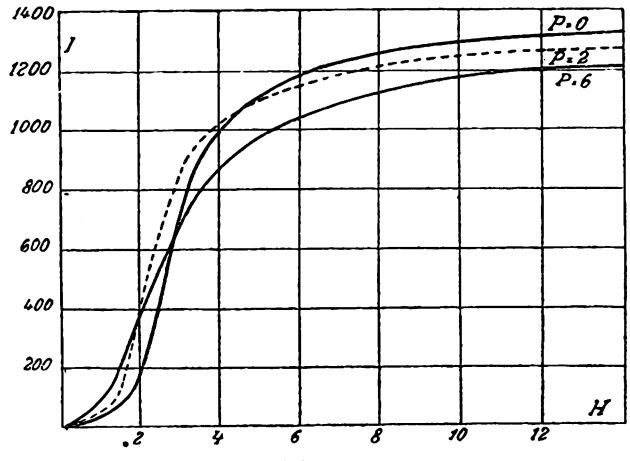


Fig. 3.

Si vede subito che per il ferro, nella fase iniziale, ad ogni valore del campo corrispondono intensità crescenti col carico ed in prossimità della saturazione si hanno effetti opposti, per cui risultano nella fase intermedia punti d'incontro delle curve, corrispondenti a tensioni via via maggiori, con la curva per $p = o$ in punti sempre più vicini all'asse delle intensità.

Le cose procedono in modo essenzialmente diverso per il nichel, avendosi per questo metallo curve di magnetizzazione sempre più depresse al crescere del carico tensore.

(1) *Pogg. Ann.* Vol. 126, p. 67, 1868.
(2) Proc. R. S., Vol. 23, p. 445, 483, 1875; Vol. 27, p. 439, 1878.

6. - Oltre gli effetti magnetoelastici relativi alla trazione hanno formato oggetto di esame le modificazioni che lo stato magnetico produce negli scorrimenti di torsione ed i fenomeni reciproci riguardanti l'influenza della torsione sull'intensità magnetica in un campo costante. Ricerche su questa influenza furono compiute da Wiedemann, Barus, Day, con sviluppo alquanto limitato, ed in tempo più recente dai fisici giapponesi Honda Schimizu e Kusakabe (1), i quali riuscirono a constatare per il ferro una legge di proporzionalità fra le variazioni dell'angolo di torsione prodotte dal campo magnetico costante e l'angolo stesso. Però le esperienze nel laboratorio di Tokyo furono eseguite in un intervallo di deformazioni assai ristretto, onde non potea ritenersi valida la deduzione che si avesse da fare, come si sosteneva da quelli, con una determinata variazione relativa del modulo di torsione per ogni valore della forza magnetizzante. Per un esame più esteso della questione e per lo studio dell'effetto magnetoelastico reciproco furono intraprese nel 1904 a Pavia (2) esperienze sui due metalli servendosi di una disposizione che permetteva di far variare la tensione del filo indipendentemente dalla torsione e di assoggettare una metà del sistema in torsione all'azione del campo, mentre l'altra parte, che a preferenza era di materiale non magnetico, serviva come elemento elastico di confronto.

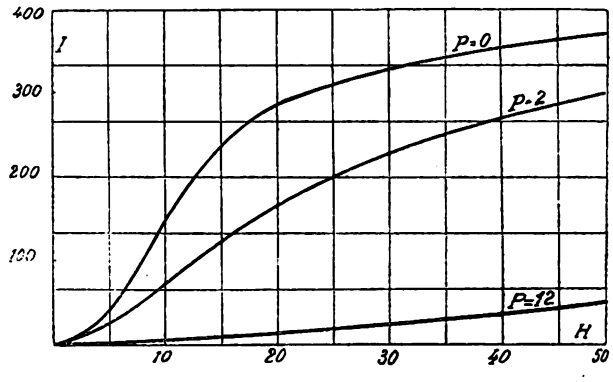


Fig. 4.

Si vide che, non ostante la maggiore uniformità di magnetizzazione con l'uso di fili aventi grande lunghezza rispetto al diametro, a cominciare da un angolo di mezzo grado per cm. si ottenevano per effetto del campo magnetico variazioni relative dell' angolo di torsione decrescenti, sebbene sempre si operasse nei limiti di perfetta elasticità dei due metalli; per cui, escludendosi l' interpretazione del fenomeno a base puramente formale, veniva meno ogni ragione di far derivare la variazione dell'angolo da modificate proprietà elastiche della sostanza in un genere di esperienze in cui si mettevano in gioco forze magnetiche piccole rispetto all'elasticità della sostanza, e fin d'allora si fu indotti a pensare che il piccolo angolo di cui ruotava l'estre-

(1) Journ. of the Coll. of science Tokyo 16, art. 13. 1902.
(2) M. Cantone - Influenza della magnetizzazione sulla torsione del ferro e del nichel. - Rend. R. Istituto Lomb., Serie II, Vol. 37, p. 435, 1904. - V. anche Ib. Vol. 37, p. 474, 535, 567.

Digitized by Google

mo del filo contorto per l'azione del campo magnetico fosse da attribuire semplicemente ad un momento addizionale di rotazione generato dalle forze magnetiche, e cioè ad un momento che dal punto di vista relativo avrebbe, a parte il segno, la stessa espressione della pretesa variazione relativa del modulo.

Siffatti momenti addizionali, che ammontavano a qualche centesimo del momento totale, risultarono in generale negativi per il ferro, positivi per il nichel; e questo diverso segno, trattandosi di due sostanze aventi proprietà elastiche affini, costituiva un nuovo argomento in favore dell'ipotesi di far dipendere in modo esclusivo dalle proprietà magnetiche il piccolo angolo di cui ruotava lo specchietto attaccato al tratto di unione dei due fili quando, mantenendosi costante la torsione, variava l'intensità del campo.

7. - Notevole importanza acquistano le ricerche di cui ci siamo occupati nel precedente numero qualora si mettano in rilievo particolari rapporti esistenti colle esperienze reciproche (1) nelle quali si studia come varia la legge di magnetizzazione quando si passa dal filo normale al filo contorto, e per convincersene basterà l'esame dei diagrammi delle annesse figure, una delle quali si riferisce al ferro e l'altra al nichel. Per ognuno dei fili in esame sono riportate le curve che, in funzione delle forze magnetizzanti, rappresentano da un canto i momenti M per i singoli angoli di torsione ω e dall'altro gli angoli $\Delta\omega_1$ che corrispondono ai momenti addizionali di cui si parlò nel numero precedente.

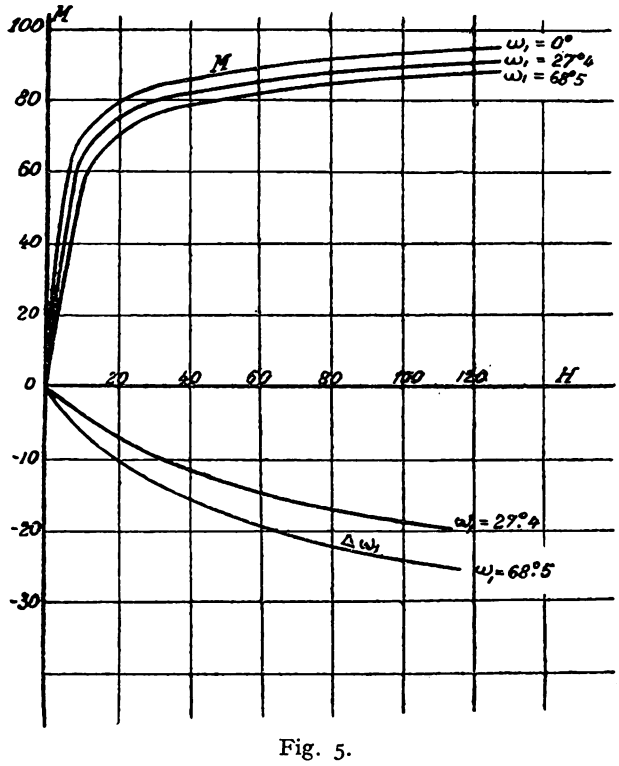


Fig. 5.

Dal confronto dei diagrammi per i pesi tensori T di kg. 3,25 e 1,25 si nota anzitutto la grande influenza del carico tensore sui risultati ottenuti per ciascun campione di nichel, e risulta che tale influenza si manifesta ad un tempo sui diagrammi delle $\Delta\omega_1$ e delle M. L'effetto è meno accentuato per il ferro, e perciò

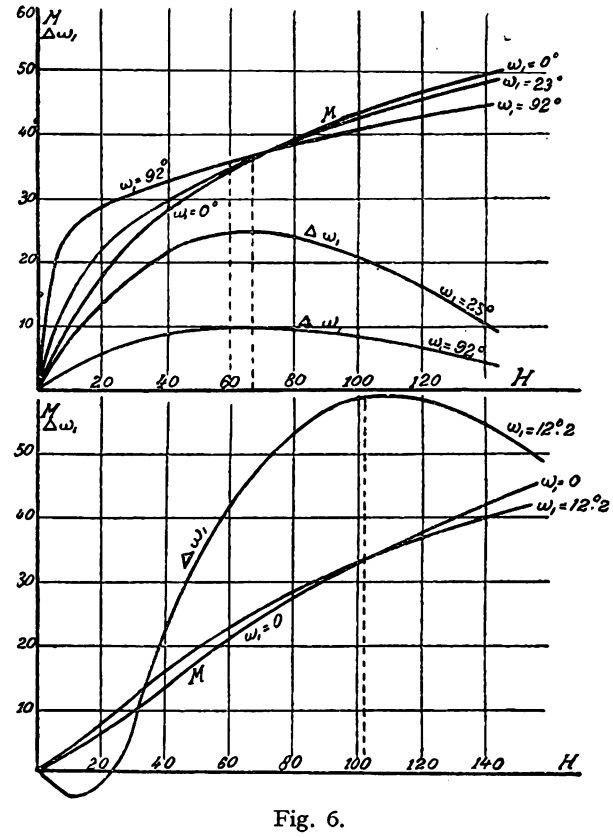


Fig. 6.

non si credette necessario entrare in particolari come per il nichel. Ma, indipendentemente da queste modalità riguardanti la tensione del filo, ciò che più attira l'attenzione è il fatto di aversi nella legge di magnetizzazione, a causa della torsione, un comportamento del nichel paragonabile a quello del ferro cimentato per trazione, in quanto che le curve dei momenti M relative a diversi valori di ω, presentano punti di intersezione analoghi ai punti critici scoperti dal Villari operando per tensione, e con questo di particolare che i punti d'incontro con la curva normale hanno le stesse ascisse dei massimi nelle curve delle $\Delta\omega$. Niente di ciò accade nel caso del ferro che ora ha il comportamento semplice manifestatosi dal nichel sotto l'influenza della tensione, però vedremo che una legge unica di correlazione abbraccia nell'ordine attuale di ricerche i risultati e del ferro e del nichel.

8. - Si tratta qui della correlazione che dal punto di vista qualitativo si è riscontrata da molti autori specialmente nei fenomeni magnetoelastici di trazione e che si estende, ma in una forma alquanto diversa ai risultati dello studio sull'effetto Wiedemann, per il quale fondamentalmente si ha torsione in un filo per l'azione di un campo magnetico longitudinale e di un campo trasversale dovuto al passaggio della corrente nel filo.

(1) V. Rend. Istituto Lomb. Vol. 37 p. 567.

Digitized by Google

Si cercò un'interpretazione di tutti questi fenomeni seguendo procedimenti analoghi a quelli del Kirchhoff nello studio della magnetostrizione, ma si vide che la natura complicata della legge di magnetizzazione, specialmente quando intervenivano forti deformazioni, portava a risultati discordanti.

Un progresso fu senza dubbio realizzato con lo studio di J. J. Thomson avente per titolo: *Applications of dynamics to physics and Chemistry*, dove, riconoscendosi dall'A. che il principio di conservazione dell'energia (base della massima parte delle ricerche teoriche sugli effetti di cui ci occupiamo) non dà per la sua indole il meccanismo di produzione dei fenomeni, si mostrò di potere riuscire allo scopo ricorrendo alle equazioni di Lagrange, atte ad individuare completamente il moto di un sistema. Il lavoro è pregevole, sia perchè i risultati finali cui si perviene non dipendono dal coefficiente di magnetizzazione k e si riferiscono agli elementi caratteristici della deformazione, all'intensità magnetica, al campo, ed ai moduli di elasticità che si possono ammettere costanti nella massima parte delle esperienze magnetoelastiche, sia perchè permettono la verifica immediata delle deduzioni relative agli effetti reciproci: osserveremo tuttavia che si ha da fare con relazioni di carattere differenziale che non si prestano ad una interpretazione semplice senza qualche ritocco suggerito dall'andamento stesso dei fenomeni; e considerazioni analoghe si applicano alle teorie di Gans e di Sano, che si servono in fondo di metodi fenomenologici, ed a quella di Heydweiller basata su considerazioni di termodinamica.

Del resto non sempre può parlarsi di risultati sperimentali conformi alle deduzioni teoriche, anzi esistono dei casi in cui i valori calcolati differiscono finanche nel segno da quelli dedotti in base alle osservazioni, e per lo più ci si trova in presenza di espressioni il cui significato fisico non è facile a stabilire.

9. - In tale stato di cose vediamo se, pur prendendo le mosse da un metodo fenomenologico, non sia preferibile seguire la via tracciata nelle ricerche di cui fu cenno nel parag. 6.

Dalla ispezione delle figure che riassumono i risultati delle esperienze magnetoelastiche di torsione, per il fatto della coincidenza dei massimi delle $\Delta\omega_1$ e dei punti d'incontro delle curve di magnetismo indotto del filo contorto con quella corrispondente al filo non deformato, fu facile argomentare che il lavoro elastico $\mu\Delta\omega_1$ del momento μ per l'angolo $\Delta\omega_1$ potesse equivalere alla variazione di energia magnetica del filo per la modificata legge di magnetizzazione, ossia alla differenza fra i valori di $\int_0^{M_1} HdM$ per il filo normale e per il filo contorto, valori che potremo indicare con A_0 ed A: restava così da verificare la relazione

$$\mu\,\Delta\omega_1 = A_0 - A\,. \qquad (2)$$

Eseguiti i calcoli si ebbero allora i risultati contenuti nella seguente tabella:

Filo di ferro $T = kg.\ 1{,}25$

	$\omega_1 = 13°{,}7$		$\omega_1 = 27°{,}4$		$\omega_1 = 68°{,}5$	
M	A_0-A	$\mu\Delta\omega_1$	A_0-A	$\mu\Delta\omega_1$	A_0-A	$\mu\Delta\omega_1$
48	— 2	— 9	— 7	— 23	— 21	— 66
66	— 7	—12	— 14	— 30	— 51	— 93
72	—10	—15	— 21	— 40	— 76	—129
78	—17	—19	— 40	— 58	—121	—203
96	—95	—42	—186	—135	—431	—482

Filo di nichel $T = 1{,}25$ $T = 3{,}25$

	$\omega_1 = 11{,}5$		$= 23{,}0$		$= 34{,}5$		$= 12{,}2$	
M	A_0-A	$\mu\Delta\omega$	A_0-A	$\mu\Delta\omega$	A_0-A	$\mu\Delta\omega$	A_0-A	$\mu\Delta\omega$
5	3	2	4	7	—	—	7	6
15	26	19	47	31	96	20	56	55
25	59	52	119	92	235	16	244	145
35	52	76	130	140	316	162	157	183
45	26	50	49	89	245	99	106	142
50	8	25	26	35	159	26	—	—

I risultalti indicano certamente, con quel grado di approssimazione che si può raggiungere in questo genere di esperienze, la verifica di una legge semplicissima di carattere energetico; e se per i valori elevati del campo magnetico l'accordo lascia alquanto a desiderare, bisogna pure tener presenti le difficoltà grandi cui si va incontro nel computo delle aree racchiuse tra le curve e l'asse dei momenti magnetici, bastando piccole variazioni nell'andamento delle curve per aversi influenze notevoli nei risultati, e particolarmente nei casi in cui le divergenze sono più accentuate.

10. - Per ciò che riguarda gli effetti magnetoelastici inerenti alla trazione l'estensione della legge importa che sia:

$$A_0\text{-}A = P\,\Delta L, \qquad (3)$$

se con P si denota il peso tensore e con ΔL la variazione di lunghezza. Dividendo entrambi i membri per il volume la (3) assume la forma $A'_0\text{-}A' = p\,\frac{\Delta L}{L}$, dove le A' simboleggiano gli integrali esprimenti i lavori di magnetizzazione in corrispondenza al volume unitario per raggiungere una data intensità e p la pressione o tensione del filo in esame. La verifica fu fatta in un primo tempo servendosi delle esperienze di Ewing sulla legge di magnetizzazione per i valori delle aree A', e delle esperienze di Honda e Schimizu sulla magnetostrizione del ferro e del nichel variamente tesi per dedurre i valori delle dilatazioni. In verità il confronto quantitativo fu allora limitato al nichel, disponendosi per il ferro di pochi elementi e non del tutti sicuri, donde il rilievo di Honda e Terada (1) che l'accordo ottenuto da esperienze con

(1) *Phys. Zeits.* Vol. 7, p. 465, 1906.

Digitized by Google

diversi materiali poteva essere fortuito. Occorreva pertanto, a raggiungere la prova in modo sicuro, far capo a risultati di altro abile sperimentatore, e per fortuna è possibile riferirsi in proposito alle accuratissime ricerche del Bidwell (1) : chè se esiste anche qui la condizione del diverso materiale cimentato, una nuova conferma ci dirà che tale inconveniente non è d' importanza essenziale nel caso della magnetostrizione, cosa che del resto si può desumere dallo accordo che si riscontra nei risultati ottenuti in tal caso da vari sperimentatori, come se nella magnetostrizione prevalesse il comportamento elastico; l'essenziale è che si disponga di ottimi risultati sulla legge di magnetizzazione per il computo degli elementi energetici integrali, variabilissimi anche per piccole modificazioni di struttura. Ciò posto, si riportano qui i risultati per un filo di nichel ricotto e per un filo di nichel crudo, assumendo per il confronto con le $\frac{\Delta L}{L}$ dedotte dalla relazione ultima le dilatazioni avute sperimentalmente dal Bidwell ed espresse in diecimilionesimi. Quanto al filo di ferro un vero confronto quantitativo non è possibile perchè mancano nelle tabelle del Bidwell i valori delle dilatazioni per piccoli campi magnetici, però l'andamento delle $\frac{\Delta L}{L}$ calcolate è del tutto conforme a quello che è da aspettarsi in base ai diagrammi di Bidwell, e cioè risulta l'esistenza di un massimo positivo per la dilatazione nella fase iniziale d'incremento del campo, ed in corrispondenza ad un valore di H che va diminuendo al crescere della tensione, in secondo luogo passaggio graduale alle dilatazioni negative per campi medi e tanto più piccoli quanto maggiore è la tensione, ed infine, quel che più importa, il raggiungimento quasi del comportamento caratteristico del nichel (valori di $\frac{\Delta L}{L}$ negativi fin dai campi più deboli) per una tensione di 1320 Kg. per cmq. mentre dalle curve del Bidwell si desume che il limite di demarcazione è di 1400 Kg.; e con ciò si prova che esistono anche elementi d'indole quantitativa per potersi parlare di un accordo soddisfacente per il ferro oltre che per il nichel.

Seguono le tabelle riassuntive :

FILO DI NICHEL INCRUDITO COLLO STIRAMENTO

	$p = 550$		$p = 1100$		$p = 1650$		$p = 2200$	
	$\frac{\Delta L}{L}$ calc.	$\frac{\Delta L}{L}$ oss.	$\frac{\Delta L}{L}$ calc.	$\frac{\Delta L}{L}$ oss.	$\frac{\Delta L}{L}$ calc.	$\frac{\Delta L}{L}$ oss.	$\frac{\Delta L}{L}$ calc.	$\frac{\Delta L}{L}$ oss.
50	— 2	— 3	— 2	— 3	— 2	— 2	— 3	— 2
100	— 5	— 8	— 6	—12	— 9	—10	—10	— 9
150	—12	—30	—16	—20	—20	—18	—24	—14
200	—24	—40	—31	—32	—39	—28		
300	—42	—57	—55	—70				

FILO DI FERRO RICOTTO

p	220	440	880	1320
I	$\frac{\Delta L}{L}$			
200	1,7	1,1	0,8	0,7
400	4,2	2,6	1,7	1,3
600	7	4,0	2,4	1,7
800	11	5,8	3,0	1,6
1000	15	7,2	2,6	0,5
1100	16	7,2	0,2	—1,0
1200	17	6,1	—0,6	—4,1

FILO DI NICHEL RICOTTO

I	$p = 550$		$p = 3300$	
	$\frac{\Delta L}{L}$ calc.	$\frac{\Delta L}{L}$ oss.	$\frac{\Delta L}{L}$ calc.	$\frac{\Delta L}{L}$ oss.
100	— 3	— 2	—13	— 9
200	—18	—18		
300	—82	—58		
400	—161	—166		

11. - I risultati contenuti in queste tabelle, e nelle precedenti relative alla torsione, indicano nel loro insieme la verifica di una legge semplicissima di carattere energetico, la quale dice che *per raggiungere una determinata intensità magnetica nel caso del ferro e del nichel sottoposti a trazione o torsione* (e si ha motivo di credere che la legge che estenda al cobalto ed alle leghe di metalli ferromagnetici) *occorre sempre la stessa quantità di energia*, o in altri termini *che la variazione di energia per l'effetto magnetico è compensata da quella corrispondente all'effetto elastico.*

Non si ha qui la pretesa di asserire che la legge valga anche se si opera fuori dei limiti di perfetta elasticità, o per valori del campo magnetico assai grandi; nè si può averla perchè il principio stabilito del compenso implicitamente suppone a rigore che non si operi nelle condizioni per le quali entrerebbero in gioco variazioni sensibili dell'energia termica, come nel caso dei processi ciclici d'isteresi, o delle semplici trasformazioni per le quali si hanno valori eccessivamente elevati delle forze magnetiche od elastiche.

Resta a vedere se la legge avanti stabilita con procedimento fenomenologico, e che ad ogni modo è confermata dalle esperienze entro i limiti degli errori ammissibili, sia da riguardare come il portato di una semplice ipotesi o abbia una ragion d'essere. A dir vero quando vi è da fare con questioni energetiche bisogna moderare il senso di curiosità che nasce dall'abito all'indagine scientifica; tuttavia, se è consentito nel caso attuale un richiamo d'indole generale, non può apparire strano il rilievo che con le relazioni esprimenti la legge siamo in fondo in presenza di identità. Infatti partendo dalla legge di Coulomb, che è d'indole essenzialmente meccanica,

(1) *Proc. R. S.* Vol. 47, p. 473, 474, 1890.

Digitized by Google

introduciamo sia il campo magnetico che l'intensità di magnetizzazione, e adottiamo poi sistemi di misure atti a dare individualità proprie a questi enti fisici ; ma noi anche allora ci riferiamo agli enti meccanici fondamentali, sicchè se, ad es. nel caso dei fenomeni magnetoelastici di torsione, facciamo il confronto fra il lavoro delle forze elastiche espresso da $\mu\Delta\omega_1$ e la variazione dell' energia magnetica data da $\int HdM$, poichè il momento magnetico M è il rapporto fra le misure di un momento meccanico e di un campo magnetico, dal confronto delle due energie risulta il confronto dei due momenti meccanici, e perciò il principio di conservazione dell'energia, applicato nella forma rudimentale agli anzidetti fenomeni magnetoelastici, non solo racchiude in sè una legge di reciprocità, ma porta a stabilire l'equivalenza delle azioni magnetiche ed elastiche in quanto esse non differiscono sotto l'aspetto generale meccanico. E considerando la questione con tali criteri di giudizio si è condotti a ritenere che la legge non sia nè fortuita nè priva di base logica e che per conseguenza, come nel caso delle equazioni di Lagrange ma col procedimento d'integrazione consentaneo al carattere ereditario dei fenomeni in esame, resti anche dimostrata la legge di reciprocità, la quale, come ora diremo, si estende all'importante gruppo di fenomeni associati all'effetto scoperto dal Wiedemann.

12. - Per mostrare in che consista questo effetto supporremo che un tubo, o anche un filo, di sostanza ferromagnetica sia magnetizzato longitudinalmente per azione di un solenoide percorso da corrente, e nello stesso tempo acquisti magnetismo trasversale per una corrente che passi per altro filo assiale nel caso del tubo o per lo stesso filo quando si faccia a meno del tubo: l'esperienza ci dice che in queste condizioni si genera una piccola torsione nel corpo sottoposto ad esperimento, e precisamente, nel caso del ferro e di una magnetizzazione longitudinale non grande, dall'estremo fisso si vede ruotare l'estremo libero nel senso orario se in tale estremo è un polo nord e la corrente va verso lo stesso estremo, con questo di caratteristico che il senso della torsione s'inverte se varia il senso di una delle due correnti magnetizzanti. Notò inoltre Wiedemann che in corrispondenza all'effetto meccanico ora indicato se ne ha uno magnetico, giacchè se si torce il filo di ferro attraversato dalla corrente si crea magnetizzazione longitudinale nelle condizioni di prima qualora permangano del pari quelle relative agli altri due elementi variabili, e cioè le condizioni che caratterizzano l'effetto Wiedemann considerato come *positivo*. Si accertò poi da Knott che per il nichel esiste un'effetto in senso opposto a quello già indicato per il ferro, e perciò detto *negativo*, che la legge di reciprocità si mantiene anche per il nichel, e che per il ferro esiste nelle primitive condizioni un effetto *negativo* se si passa dai piccoli ai grandi campi, onde risulta un certo valore del campo longitudinale per cui si annulla l'angolo di torsione.

Maxwell diede una giusta interpretazione generica del fenomeno tenendo presente che in un corpo sottoposto a torsione esistono a causa degli scorrimenti due direzioni tangenziali, inclinate a 45° rispetto alle generatrici, per le quali si ha da una parte dilatazione massima e dall'altra massima contrazione e che, per l'effetto di magnetostrizione scoperto da Joule, dalla coesistenza dei due campi prende origine una componente della deformazione efficace per il graduale spostamento angolare delle successive sezioni nel senso indicato dall'esperienza. Maxwell spiegò anche l'effetto reciproco di magnetizzazione longitudinale osservando che la torsione genera le note dilatazioni e contrazioni secondo le tangenti inclinate a 45° e che per il magnetismo trasversale, dovuto all'unica corrente longitudinale, nella direzione cui corrisponde la massima dilatazione si esalta la rispettiva componente dell'intensità magnetica, mentre l'altra viene ridotta, sicchè nasce dalla dissimmetria una componente longitudinale nel senso svelato dall'esperienza, con le modalità fino ad un certo punto prevedibili in ogni caso.

13. - Però non si può a questo modo compiere una trattazione teorica rigorosa ; e per i tentativi fatti da alcuni fisici, fra cui Nagaoka e Honda, fino a quelli recenti di Williams (1), se si riesce a dare ragione di alcuni particolari, per altri si viene a risultati lontani dalla realtà e talvolta anche assurdi.

Solo con la memoria del Fromy pubblicata nel fascicolo di gennaio del *Journal de Physique* si è data una soluzione completa del problema. Il Fromy parte dallo studio della deformazione di una lamina piana assoggettata all' azione simultanea di due forze magnetizzanti tangenziali ed ortogonali, tenendo conto delle dilatazioni complessive rispetto alle stesse direzioni ed allo spessore ; suppone poi di piegare la lamina a cilindro, ed individuate le direzioni tangenziali degli spostamenti dovuti alla risultante dei due campi, trova le loro componenti tangenziali rispetto alla circonferenza terminale libera (supposta l'altra legata ad un sostegno), per venire in ultimo all'angolo di torsione totale Θ : si arriva così alla formula

$$\Theta = 2\,\frac{\rho - \rho'}{r}\quad\frac{H^2 + C^2}{H\,C}\,,$$

dove H, C stanno ad indicare le intensità dei campi longitudinale e trasversale, dovuti alla corrente magnetizzante del solenoide coassiale al tubo ed alla corrente che passa per un filo sottile in direzione dell'asse, ρ, ρ' denotano le contrazioni longitudinali e trasversali relativamente all'effetto Joule di magnetostrizione, ed r il raggio medio del tubo.

L'A. non potè disporre degli elementi ρ e ρ' in un grande intervallo sperimentale perchè le esperienze di Williams, dalle quali sono dedotti questi dati, non lo consentono con la larghezza necessaria ad una verifica completa della teoria da lui sviluppata ; ma si servì di curve tipiche ricavate in base ai valori sperimentali effettivi, ed ebbe una conferma assai soddisfacente di tutti i particolari più notevoli ri-

(1) V. l. c.

Digitized by Google

guardanti il caso di prevalenza del campo longitudinale o del trasversale, dell'annullarsi della torsione per l'assenza o del solo campo longitudinale o del solo campo trasversale, ed altresì dell'annullamento per quel particolare stato per cui ρ e ρ' sono uguali, riuscendo così a trovare la spiegazione del fatto che questa mancanza di torsione si ha per un valore basso del campo longitudinale, rispetto al valore critico del Villari, in quanto ciò risulta dalla legge stessa di variazione di ρ-ρ'.

Il carattere puramente fenomenologico del processo seguito dal Fromy potrebbe far supporre che le deduzioni della teoria da lui esposta siano valide anche se si arriva a campi magnetici elevati, se non che resta sempre il dubbio che gli effetti d'isteresi (diversi per le due specie di magnetismo), e l'intervento degli effetti calorifici concomitanti, permettano di considerare indipendenti fra loro le azioni dei due campi per i singoli contributi alla torsione complessiva da essi risultante.

Invece appare del tutto legittima la previsione teorica del fenomeno reciproco trovato dal Wiedemann riguardante la magnetizzazione longitudinale, giacchè si tratterebbe di precisare il ragionamento che venne fatto dal Maxwell, nelle linee generali, sulla seconda parte dell'effetto Wiedemann tenendo conto dell'influenza che gli scorrimenti producono sulla legge di magnetizzazione secondo le varie direzioni tangenziali. Ed atteso il legame diretto che esiste tra il fenomeno Wiedemann fondamentale e gli effetti di magnetostrizione rivelantisi con le dilatazioni lineari non dovrebbe essere esclusa la validità della legge di compenso tra il lavoro delle forze elastiche per la piccola torsione e la variazione di energia relativa alle forze magnetiche, per il fatto che si modifica la legge di magnetizzazione del tubo o del filo in esame quando si aggiunge il campo trasversale dovuto alla corrente in direzione dell'asse.

Osserveremo infine che, siccome nel caso dell'effetto Wiedemann intervengono tre fattori, assieme ai due fenomeni reciproci avanti considerati è da aspettarsene un terzo per cui la variabile dipendente sarebbe il campo trasversale; ed in realtà risulta che torcendo un filo magnetizzato longitudinalmente si crea un campo magnetico trasversale, diretto secondo il moto delle lancette dell'orologio nel ferro debolmente magnetizzato, ed in senso opposto nel nichel e nel ferro fortemente magnetizzato; per cui si mantiene sempre, anche nei particolari, il divario fra i due metalli dedotto in base all'effetto di magnetostrizione, che dal punto di vista sperimentale e per la legge di compenso può considerarsi come il cardine di tutte le azioni magnetoelastiche.

14. - Restano ad esaminare ancora gli interessanti effetti magnetici dovuti a cicli di torsione per un filo sottoposto ad un campo magnetico costante.

Si vide da Matteucci, Wertheim e Wiedemann che l'intensità di magnetizzazione del ferro per un determinato valore di H diminuisce notevolmente con la torsione. W. Thomson (1) trovò poi con procedimento sistematico simmetria nell'effetto ciclico per torsioni nei due sensi e notò che l'entità del fenomeno si rendeva minore al crescere della tensione del filo. Uno studio nello stesso indirizzo, compiuto dal Nagaoka (1) nel 1889 per il nichel, permise di assodare che, mentre con piccoli pesi tensori il comportamento di questo metallo è per le torsioni opposto a quello del ferro, cioè tale che torcendo il filo a destra o a sinistra si ha aumento d'intensità magnetica e detorcendolo diminuzione, invece con carichi tensori crescenti con la grandezza del campo magnetico, per una torsione in senso contrario alla primitiva s'inverte la polarità del nichel, e se lo stiramento è abbastanza accentuato si finisce coll'avere, invece delle curve a due cappi con le punte rivolte dalla medesima parte, curve ad un cappio del tipo di quelle ordinarie dell'isteresi magnetica con una quasi perfetta simmetria rispetto all'origine ma, con questa differenza, che risultano tracciate in senso da palesarsi un'isteresi negativa. Nè a questo si limitano le anomalie, giacchè per forze magnetizzanti al disopra di un certo limite la dissimmetria che si crea nei due cappi rivolti in alto al crescere del peso tensore si manifesta in senso opposto a quello avanti indicato, sicchè si arriva anche nel nuovo caso ad una curva ad un cappio per le intensità magnetiche in funzione degli angoli di torsione variabili ciclicamente nei due sensi, se non che il cappio si trova ora girato di 90° rispetto all'orientazione che avrebbe assunto in condizioni analoghe con un campo costante debole.

Banti (2) in un successivo lavoro constatò che l'inversione della polarità poteva aversi, oltre che col crescere dei pesi tensori, con ripetuti cicli, ma il Nagaoka accertò che in tali condizioni si aveano nella fase d'inversione *punti conseguenti*, epperò con un'intensità magnetica generale così piccola da sfuggire quasi all'osservazione. Dello stesso genere di esperienze si occupò l'A. (3) di questa rassegna per portare qualche nuovo contributo sul comportamento eccezionale del nichel, e specialmente per esaminarlo riferendosi alle forze deformatrici, e non alle torsioni come prima si era fatto. Risultò da tale esame che, con cicli di torsioni fra determinati limiti di forze estreme, sotto l'azione del campo terrestre e adoperando un peso tensore di 370 Kg. per cmq. s'inverte la polarità dei fili di nichel al cambiare di segno della forza deformatrice, e che d'altra parte con la ripetizione del processo ciclico si estende l'ampiezza dell'intensità magnetica fino a raggiungere, colla torsione estrema di un grado per cm, un valore 72 volte maggiore di quello che si avrebbe per la semplice azione del campo terrestre. Si ha poi la più grande analogia fra i cicli unilaterali o bilaterali d'intensità magnetica in funzione dei pesi torcenti e gli ordinari cicli d'isteresi elastica, però, mentre le curve dell'intensità in funzione di questi pesi risultano tutte tracciate nel senso orario, quando invece si assumono sull'asse delle ascisse gli angoli di torsione, per piccoli valori estremi il senso rimane inalterato ed un'inversione si produce venendo alle ampiezze più grandi,

(1) *Pogg. Ann.*, Vol. 103, p. 563; Vol. 106, p. 161.

(1) *Phil. Mag.*, Vol. 27, p. 117, 1878.
(2) *Atti R. Acc. dei Lincei*, Vol. 7, 1891.
(3) *Nuovo Cimento*, Aprile 1897.

Digitized by Google

donde mancanza d'isteresi delle intensità per un valore intermedio dell' ampiezza relativa alla variazione dell'angolo.

Questi particolari mostrano la grande influenza che, nel genere di fenomeni magnetoelastici ora in esame, esercita il processo di accomodazione nel caso del nichel cimentato fra limiti costanti di forze deformatrici. Il fatto non è nuovo, anzi pare esclusivo del nichel cimentato per torsione, in quanto si rileva allora una esaltazione dei fenomeni d' isteresi, mentre per gli altri metalli, anche operando tra forze deformatrici estreme eccessivamente grandi e con fili ricotti, la ripetizione dei cicli porta, oltre al sensibile decremento delle aree d' isteresi, una piccola diminuzione del valore assoluto delle deformazioni estreme.

Ma vi è di più. È noto il fenomeno Barkausen per il quale, eccezionalmente per il nichel, si manifestano variazioni saltuarie dell'intensità magnetica quando in modo continuo si fa variare la forza magnetizzante: il fenomeno è stato oggetto in questi ultimi tempi di svariate ricerche, e notevoli sono quelle recentissime del Forrer che con un processo fotografico è riuscito a trovare nei diagrammi relativi a cicli magnetici di fili di nichel preventivamente incurvati due tracce evidenti di discontinuità ai passaggi, in un ampio ciclo, dalla fase riversibile di magnetizzazione alla fase per cui bruscamente si arriva quasi all'intensità del secondo estremo del ciclo.

Il Forrer (1) crede che si abbia da fare con un puro effetto magnetico, ed appoggiandosi alle modalità del fenomeno ritiene di aver trovato una indicazione precisa per attribuire all'atomo di nichel due anelli elettronici di valenza ortogonali tra loro. Ma non pare a tutti che una dimostrazione vera e propria sia data, e ad ogni modo non può dirsi che si tratti di una origine esclusivamente magnetica, poichè in occasione di uno studio sulla resistenza elastica dei metalli alla trazione fu messo in evidenza (2) che fili di nichel ricotto, inizialmente alquanto deformati, nei diagrammi ottenuti per registrazione diretta davano luogo a linee a gradinata nella fase di notevole cedevolezza del filo, con deformazioni brusche da 1 a 6 mm ; e siccome per gli altri metalli (3), (ad eccezione dell'acciaio ma in misura assai piccola) non si ebbero effetti di tal genere, si ha motivo di credere che il comportamento eccezionale del nichel sia di natura elastica e quindi derivante in modo diretto da speciali condizioni di struttura di questo metallo nello stato di assetto in cui per i metalli ferromagnetici le modalità della polarizzazione sono forse da ascrivere a rapporti meccanici fra gruppi di atomi piuttosto che fra semplici atomi. E partendo da tale concetto il processo di accomodazione anomala del nichel si presenterebbe sotto l'aspetto più naturale nell'ordine dei fenomeni magnetoelastici, e particolarmente in quelli in cui intervengono gli scorrimenti di torsione che si prestano più delle semplici dilatazioni ad influire sulle azioni orientatrici.

Di quale importanza sia tal genere di deformazione nello scindere la compagine molecolare in guisa da rendere i vari costituenti magnetici più liberi di orientarsi, anche per tracce di campi interni prodotti casualmente, si può argomentare dal fatto (1) che fili di nichel, sottratti all'azione del campo terrestre, mediante semplici torsioni cicliche bilaterali assumono intensità variabili ciclicamente nei due sensi, e con ampiezza finale corrispondente nelle condizioni normali a campi estremi di parecchi *gauss*. Senza dubbio qui si crea energia magnetica a spese di lavoro compiuto dalle forze elastiche con un meccanismo di azione che dipende e dalle particolari condizioni di struttura del nichel e dallo stato magnetico latente dovuto al campo interno.

Le azioni magnetoelastiche, di cui si è procurato di dare un concetto generale in questa rassegna, formano parte della estesa categoria comprendente le svariate azioni del campo magnetico, e non la meno importante attesi gli stretti rapporti esistenti tra i fenomeni magnetici e quelli direttamente dovuti alle reazioni elastiche sensibili alle più lievi alterazioni di struttura dei solidi. Di siffatto legame è prova evidente il parallelismo fra le due specie di fenomeni con caratteri di ereditarietà che farebbero apparire gli effetti del campo sulle sostanze ferromagnetiche subordinati alle loro proprietà elastiche anche nei particolari riguardanti l' isteresi e l'accomodazione; ma in questo terreno non si è potuto estendere il procedimento energetico, destinato a ritrarre le leggi di reciprocità ed il carattere ereditario della magnetizzazione, a causa delle conoscenze limitatissime sui fenomeni termici concomitanti e per la natura stessa delle complicazioni alle quali necessariamente si va incontro.

(1) *V. Comptes Rends.* 3 Nov. 1926, p. 738.
(2) M. CANTONE, *Rend. Acc. dei Lincei*, Vol. 31, 1° Sem.; p. 414, 1922.
(3) V. Atti del R. Istituto di Incoraggiamento di Napoli, 1922. Rend. Acc. dei Lincei, Vol. 31, p. 414.

(1) M. CANTONE - *Nuovo Cimento*, 1897.

Digitized by Google

PROF. ANTONINO LO SURDO

DELLA R. UNIVERSITÀ DI ROMA

IL PASSAGGIO DELL'ELETTRICITÀ ATTRAVERSO AI GAS IONIZZATI

Digitized by Google

Digitized by Google

Si sogliono considerare isolanti i gas in condizioni ordinarie, poichè la loro conduttività elettrica è talmente piccola che generalmente si può trascurare. Però i gas possono diventare conduttori, cioè acquistare una conduttività incomparabilmente più grande di quella ordinaria, per l'azione dei raggi X o delle radiazioni emesse dalle sostanze radioattive, e per altre cause.

Un gas conduttore ha le seguenti proprietà caratteristiche:

1) Esso mantiene la sua conduttività per un piccolo tempo dopo che cessa di agire la causa che lo rende conduttore.

Questo fatto si può verificare mediante la seguente esperienza. L'aria sottoposta in B all'azione dei raggi X viene aspirata mediante una pompa collegata col tubo F (fig. 1): essa entra nel tubo C

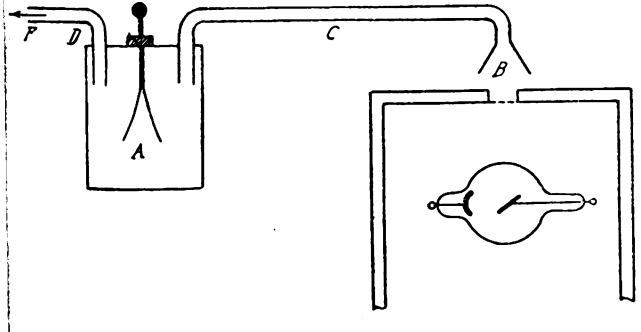


Fig. 1.

e dopo un certo tempo arriva nel recipiente A, dentro il quale si trova un elettroscopio. Se si regola l'aspirazione in modo che l'aria percorra il tubo C in un tempo piccolo, per es. un secondo, essa scarica l'elettroscopio: ciò indica che in questo tempo non ha perduto la sua conduttività. Se si arresta l'aspirazione, l'elettroscopio mantiene la sua carica purchè esso sia riparato dall'azione diretta dei raggi, ciò che si può ottenere racchiudendo il tubo che emette i raggi X dentro un adatto involucro di piombo.

2) Il gas perde la sua conduttività quando viene filtrato attraverso la lana di vetro o fatto gorgogliare nell'acqua o anche fatto passare attraverso tubi metallici lunghi e sottili.

Lo stesso apparecchio della fig. 1 può servire per mostrare questa proprietà: se si inserisce opportunamente tra B ed A un filtro o una bottiglia di lavaggio, o un tubo sottile, l'aria aspirata da B non scarica più l'elettroscopio.

3) Il gas perde la sua conduttività nel passaggio attraverso ad un forte campo elettrico.

Questa proprietà si può mostrare col solito apparecchio, modificato però coll'aggiunta di un filo metallico isolato dentro il tubo C. L'aria aspirata da B non scarica l'elettroscopio se è applicata una forte differenza di potenziale fra il tubo e il filo interno, cioè se essa arriva all'elettroscopio dopo avere attraversato un forte campo elettrico.

Da queste proprietà si deduce che la conduttività è dovuta a qualche cosa che trovasi nel gas e che porta delle cariche elettriche.

Queste e le altre proprietà dei gas conduttori si spiegano coll'ammettere che la conduttività dei gas sia dovuta a particelle elettrizzate positivamente o negativamente mescolate ad essi. Queste particelle si chiamano *ioni*.

Il meccanismo della conduzione è il seguente. I raggi X o un'altra sorgente ionizzante, producono nel gas degli ioni. Questi si muovono sotto l'azione del campo elettrico che si stabilisce fra due elettrodi a differente potenziale: i positivi vanno verso l'elettrodo negativo e i negativi verso il positivo.

L'intensità della corrente dovuta alla convezione degli ioni si può determinare sperimentalmente colla disposizione rappresentata nella fig. 2. Il gas compreso fra due piatti metallici paralleli A e B è mantenuto sotto l'azione di una sorgente ionizzante. Il piatto A è in comunicazione con un polo di una batteria di pile ed il piatto B con una coppia di quadranti di un elettrometro; il secondo polo della batteria e l'altra coppia di quadranti sono collegati al suolo. L'intensità della corrente è data dalla velocità di spostamento dell'ago dell'elettrometro. Variando il numero delle pile della batteria, e quindi la differenza di potenziale fra i due piatti si trova che la intensità della corrente segue l'andamento rappresentato dalla fig. 3. La parte rettilinea del diagramma in vicinanza dell'origine indica che quando il campo è debole vale approssimativamente la legge di Ohm e che l'intensità i della corrente

Digitized by Google

cresce rapidamente al crescere della differenza di potenziale V. Continuando a crescere la differenza di potenziale, la corrente cresce ancora, ma

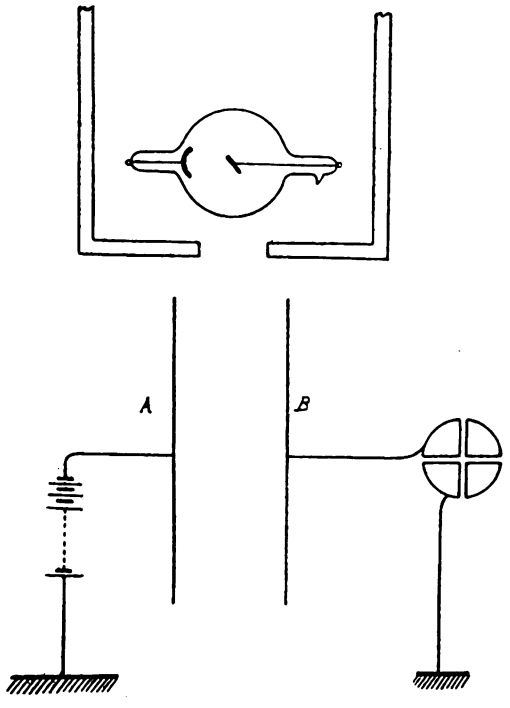


Fig. 2.

sempre più lentamente e fino a che non raggiunge un certo valore che rimane sensibilmente costante quando si aumenta ancora la differenza di potenziale (1). Questa corrente costante si chiama la *corrente di saturazione*.

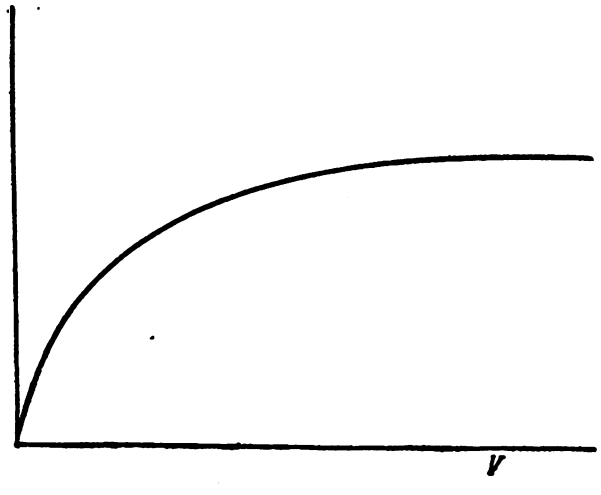


Fig. 3.

L'intensità della corrente di saturazione dipende dall'azione ionizzante della sorgente e dalla quantità di gas ionizzato compreso fra i due piatti. Contrariamente a quello che avviene per i conduttori metallici o elettrolitici, l'intensità della corrente aumenta se si aumenta lo spessore del gas conduttore: difatti aumentando la distanza tra i piatti A e B, l'intensità della corrente aumenta pure, purchè la differenza di potenziale tra A e B, che rimane costante, sia sufficiente per mantenere la saturazione.

Questi fatti si spiegano semplicemente colla teoria della ionizzazione. La corrente è dovuta al trasporto delle cariche che gli ioni positivi portano all'elettrodo negativo, ed i negativi all'elettrodo positivo: la sua intensità deve quindi raggiungere il massimo valore, cioè la saturazione, quando il numero degli ioni prodotti dalla sorgente ionizzante in un secondo nel gas compreso tra i due piatti è eguale al numero di quelli che nello stesso tempo cedono le loro cariche agli elettrodi. E si spiega pure come coll'aumentare della distanza fra i piatti aumenti la corrente di saturazione, poichè quando tutto il gas compreso fra i due piatti è ionizzato uniformemente, il numero degli ioni prodotti nell'unità di tempo dalla sorgente ionizzante deve essere proporzionale al volume del gas ionizzato, che cresce colla distanza fra i piatti.

Prima di esaminare il comportamento della conduzione per differenze di potenziale più piccole di quelle che producono la saturazione, bisogna notare che due altre proprietà caratteristiche dei gas ionizzati, e cioè:

a) il numero degli ioni presenti in un gas mantenuto sotto l'azione di una sorgente ionizzante non cresce oltre un certo limite, anche quando non agisce un campo elettrico.

b) la ionizzazione del gas sparisce spontaneamente dopo un piccolo tempo da quando cessa l'azione ionizzante;

portano ad ammettere la *ricombinazione degli ioni*, e cioè che gli ioni muovendosi nel gas vengano talvolta in collisione tra loro, e che quando le collisioni avvengono tra ioni positivi e ioni negativi capita ogni tanto che due ioni di segno opposto si riuniscano insieme formando un sistema elettricamente neutro. Con la ricombinazione si spiega infatti come la ionizzazione di un gas, appena cessata l'azione ionizzante, vada diminuendo fino a sparire del tutto dopo un certo tempo se ioni positivi e negativi sono in egual numero. E si spiega pure il limite della ionizzazione, poichè se un gas è mantenuto sotto l'azione della sorgente ionizzante cresce col tempo il numero degli ioni, ma aumenta pure il numero delle collisioni e quindi quello delle ricombinazioni: e si comprende facilmente che la ionizzazione del gas non potrà più crescere quando il numero degli ioni prodotti dalla sorgente sarà compensato esattamente dal numero degli ioni che si ricombinano.

Ciò posto, possiamo prendere in esame la conduzione del gas per campi deboli. Supponiamo che il gas sotto l'azione dei raggi X abbia già raggiunto la massima ionizzazione, che corrisponde alla compensazione fra gli ioni che si formano e quelli che si ricombinano.

(1) La corrente torna a crescere, e molto rapidamente, quando la differenza di potenziale è così alta che il campo da essa prodotto diventa capace di ionizzare il gas. Ciò si ha secondo J. J. Thomson, con un gradiente di circa 30.000 volta per cm.

Digitized by Google

Si applichi allora tra i due piatti una differenza di potenziale molto più piccola di quella che produce la saturazione. Come vedremo in seguito, la velocità degli ioni nel campo elettrico è proporzionale all'intensità del campo stesso, e quindi gli ioni che si trovano tra i due piatti, sollecitati da un campo debole, si muovono lentamente avviandosi verso gli elettrodi di segno opposto, ma la maggior parte di essi si ricombinano prima di arrivarvi. È così che si ha una corrente debole, corrispondente al trasporto delle cariche di una piccola parte degli ioni formati dalla sorgente.

Col crescere della differenza di potenziale, cresce la velocità degli ioni, cioè diventa più piccolo il tempo che gli ioni impiegano per arrivare agli elettrodi, e con questo tempo diminuisce pure il numero delle ricombinazioni: gli ioni prodotti dalla sorgente raggiungono quindi in numero sempre maggiore gli elettrodi, e si ha un aumento della intensità di corrente, al crescere della differenza di potenziale, fino a che gli ioni non vengono portati sui piatti in un tempo così breve che il numero delle ricombinazioni risulti trascurabile. Si raggiunge allora la saturazione.

Da quando è detto avanti risulta che, per una data intensità della sorgente ionizzante, la conduttività di un gas dipende essenzialmente dalle seguenti cause, che considereremo separatamente, e cioè: la perdita di ioni per ricombinazione e per diffusione, la velocità che gli ioni assumono in un campo elettrico, e la grandezza della carica che essi trasportano.

Ricombinazione degli ioni.

Se si ammette che il numero delle ricombinazioni sia una frazione costante del numero delle collisioni e cioè che questo numero sia proporzionale alle concentrazioni degli ioni negativi e positivi presenti, la variazione al secondo del numero di ioni positivi n, o negativi m, contenuti in un cm.^{3} del gas, risulta:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{dm}{dt} = q - \alpha n m \quad (1)$$

dove q indica il numero degli ioni positivi e quello dei negativi prodotti dalla sorgente ionizzante al minuto secondo in un cm.^{3} del gas.

Se il gas nel suo complesso è elettricamente neutro si può porre $n = m$, e si ha

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n^2 \quad (2)$$

Questa equazione ci dà:

a) la concentrazione degli ioni quando il gas ha raggiunto la ionizzazione costante:

$$n_0 = \sqrt{\frac{q}{\alpha}} \quad \left(\text{per } \frac{dn}{dt} = 0\right) \quad (3)$$

b) l'incremento della ionizzazione del gas in funzione della durata t dell'azione ionizzante:

$$n = k \frac{e^{2k\alpha t} - 1}{e^{2k\alpha t} + 1} \quad (4)$$

(risolvendo la (2), e ponendo $k^2 = \frac{q}{\alpha}$, $n = 0$ per $t = 0$),

c) la ionizzazione del gas dopo il tempo t dall'istante in cui si toglie la sorgente

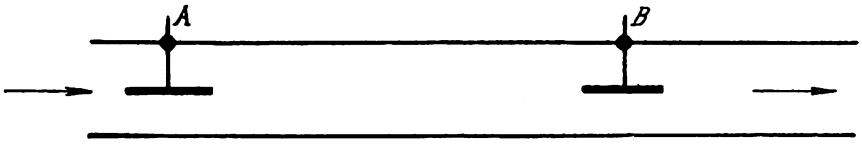


Fig. 4.

$$n = \frac{n_0}{1 + n_0 \alpha t} \quad (5)$$

(ponendo nella (2) $q = 0$, risolvendo, e ponendo $n = n_0$ per $t = 0$).

Il coefficiente di ricombinazione α si può determinare coll'apparecchio rappresentato dalla fig. 4. Un lungo tubo in cui il gas ionizzato viene fatto passare lentamente è munito di due elettrodi isolati A e B, per mezzo dei quali si può fare la misura della corrente di saturazione in due parti del tubo. I valori che si ottengono con questa misura sono proporzionali degli ioni contenuti in un cm.^{3} del gas in prossimità di A e di B rispettivamente.

Conoscendo la velocità del gas nel tubo e la distanza tra i due elettrodi isolati, si calcola il tempo che impiega il gas a passare da A in B. Se si regola la velocità del gas in modo che il valore della corrente di saturazione in B risulti eguale alla metà di quello in A, e si misura il tempo T impiegato dal gas per andare da A a B, cioè il tempo occorrente perchè metà degli ioni si ricombinino, si può scrivere, ponendo nella (5) $n = \frac{n_0}{2}$ per $t = T$:

$$\alpha = \frac{1}{n_0 T} \quad (6)$$

Sia i la corrente di saturazione misurata all'elettrodo A, V il volume del gas ionizzato uniformemente che passa nel tubo in un secondo, si ha, indicando con e la carica di un ione:

$$i = n_0 V e,$$

e sostituendo nella precedente relazione

Digitized by Google

$$\alpha = \frac{Ve}{iT}. \qquad (7)$$

Il valore del coefficiente di ricombinazione degli ioni trovato da Townsend per l'aria in condizioni ordinarie è $\alpha = 3480\, e$, ossia, ponendo $e = 4{,}7 \cdot 10^{-10}$, $\alpha = 1{,}6 \cdot 10^{-6}$.

Da questo valore si deduce che se in un cm.^{3} di aria ionizzata si trovano inizialmente 10^6 ioni, metà di essi si ricombinano in circa 0,6 secondi, ed il 99% in circa 62 secondi.

Diffusione degli ioni.

I gas conduttori perdono la loro conduttività, passando attraverso a una sostanza divisa minutamente, come la lana di vetro, o attraverso a un tubo metallico sottile. Questa perdita si spiega ammettendo che gli ioni si diffondano, e che quindi quando attraversano spazi molto ristretti urtano facilmente colle pareti e cedono ad esse la loro carica. In un recipiente contenente un gas ionizzato lo strato di gas a contatto colle pareti non contiene quindi ioni, e si ha un gradiente di concentrazione che provoca la diffusione degli ioni dall'interno verso le pareti.

Si ammette che gli ioni si diffondano in un gas come le molecole di un altro gas mescolato ad esso in piccole proporzioni (1), e che quindi valgano per gli ioni le leggi della diffusione dei gas. Perciò, se il gas è contenuto tra due piatti metallici paralleli (fig. 5) e quindi la diffusione avviene in direzione normale,

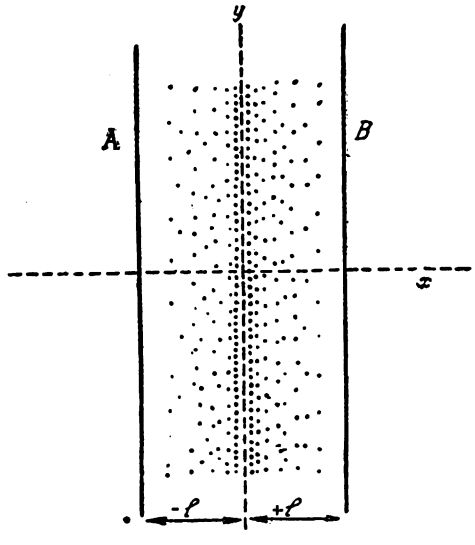


Fig. 5.

secondo l'asse x, il numero degli ioni positivi che passano in un secondo attraverso all'unità di superficie parallela ai piatti è proporzionale al gradiente di concentrazione, è uguale cioè a $D\frac{dn}{dx}$, ed il numero degli ioni positivi acquistati nell'unità di tempo da un cm.^{3} del gas è eguale a $D\frac{d^2n}{dx^2}$, se D rappresenta il coefficiente di diffusione degli ioni positivi.

Tenendo conto della perdita di ioni per diffusione, l'equazione della ionizzazione (1) diventa:

$$\frac{dn}{dt} = q - \alpha n m + D\frac{d^2n}{dx^2}, \qquad (8)$$

e quando i due piatti sono così vicini che la ricombinazione sia trascurabile rispetto alla diffusione:

$$\frac{dn}{dt} = q + D\frac{d^2n}{dx^2}. \qquad (9)$$

Dopo qualche tempo dall'inizio dell'azione ionizzante si stabilisce una ionizzazione costante: ciò si ha quando il numero degli ioni che si perdono per la diffusione è uguale a quello degli ioni prodotti dalla sorgente. Si ha allora:

$$q + D\frac{d^2n}{dx^2} = 0 \qquad (10)$$

Siano $x = -l$, $x = +l$ le equazioni delle facce interne dei due piatti: risolvendo l'equazione (10) e ponendo $n = 0$ per $x = \pm l$, si ottiene

$$n = \frac{1}{2}\frac{q}{D}(l^2 - x^2) \qquad (11)$$

Il nunero totale di ioni compreso tra i due piatti è quindi, per unità di sezione:

$$\int_{-l}^{+l} n\,dx = \frac{2}{3}\frac{q}{D}l^3. \qquad (12)$$

Questa relazione può essere applicata alla determinazione del coefficiente di diffusione. Si tolga la sorgente ionizzante e nello stesso tempo si applichi tra i due piatti una forte differenza di potenziale; allora tutti gli ioni positivi vanno verso il piatto a potenziale più basso e, se questo è collegato con un elettrometro, si potrà misurare la quantità di elettricità Q ceduta dagli ioni positivi, quantità che è eguale al prodotto del numero degli ioni per la carica di un ione, cioè per la (12):

$$Q = \frac{2}{3}\frac{q}{D}l^3 e.$$

Quindi si lasci agire sul gas la sorgente ionizzante e si applichi tra i due piatti un campo elettrico abbastanza intenso perchè si formi la corrente di saturazione; il piatto a potenziale più basso riceve allora, al secondo e per unità di sezione, la carica positiva $2\,q\,l\,e$.

Indicando con d_1 e d_2 le deviazioni dell'ago dell'elettrometro, proporzionali rispettivamente alla ca-

(1) In un gas fortemente ionizzato, in condizioni normali il rapporto fra la concentrazione degli ioni e quella delle molecole del gas è stato trovato dell'ordine di 10^{-10}.

Digitized by Google

rica Q e alla carica portata in un secondo dalla corrente di saturazione, si ha:

$$d_1 = \frac{1}{3}\frac{l^2}{D} d_2 \qquad (13)$$

colla quale si può calcolare D.

Townsend ha determinato i coefficienti di diffusione misurando la diminuzione della corrente di saturazione e quindi del numero di ioni, che un gas ionizzato subisce, per la diffusione passando attraverso a tubi metallici sottili. I valori da lui trovati per gli ioni prodotti dai raggi X o dalle sostanze radioattive sono i seguenti:

	ioni +	ioni—
Aria secca	0,028	0,043
» umida	0,032	0,026
Anidride carbonica secca	0,023	0,026
Idrogeno secco	0,123	0,190

Velocità degli ioni nel campo elettrico.

Come si è visto avanti, al gradiente di concentrazione $\frac{dn}{dx}$ corrisponde il passaggio, attraverso all'unità di superficie normale ad x, di un numero di ioni al secondo:

$$N_1 = D\frac{dn}{dx}$$

Ma N_1 è uguale al prodotto della velocità media degli ioni secondo x per la loro concentrazione, cioè:

$$N_1 = Vn,$$

si ricava quindi:

$$V = \frac{D}{n}\frac{dn}{dx} \qquad (14)$$

Gli ioni, comportandosi come le molecole di un gas, esercitano una pressione parziale eguale a quella che eserciterebbero alla stessa temperatura un egual numero di molecole di un altro gas, pressione che è proporzionale al loro numero. Nella (14) si possono quindi sostituire le pressioni, e si ottiene

$$V = \frac{D}{p}\frac{dp}{dx} \qquad (15)$$

Questa proporzionalità tra la forza che agisce sull'unità di volume del gas, $\frac{dp}{dx}$, e la velocità media degli ioni nella stessa direzione, è indipendente dalla natura della forza agente, quindi gli ioni che si trovano in un campo elettrico hanno una velocità media u che è proporzionale alla forza che agisce sull'unità di volume del gas, forza che è eguale ad Xen, se X è l'intensità del campo. Sostituendo nella (15) si ha

$$u = \frac{D}{p} X e n, \qquad (16)$$

la quale mostra che la velocità media degli ioni nel campo elettrico è proporzionale all'intensità del campo.

La velocità media u_0 che gli ioni assumono in un campo unitario, che si chiama *la mobilità degli ioni*, risulta

$$u_0 = D\frac{N}{\pi} e \qquad (17)$$

In questa formula $\frac{N}{\pi}$ indica il rapporto fra il numero delle molecole contenute in un cm.^{3} d'aria, e la pressione dell'aria stessa. Questo rapporto si può sostituire nella (16) a $\frac{n}{p}$, poichè, come si è visto, gli ioni si comportano, per quanto si riferisce alle pressioni da essi prodotte, come le molecole non cariche di un gas, e per il fatto che il rapporto fra il numero delle molecole e la pressione ha lo stesso valore per tutti i gas alla stessa temperatura.

Della relazione (17) si è servito Townsend per il confronto della carica media degli ioni nei gas ionizzati colla carica media trasportata dagli ioni monovalenti nell'elettrolisi (pag. 159).

Le velocità medie degli ioni nel campo elettrico di intensità uno, sono state determinate con vari metodi. Le prime determinazioni furono fatte da Rutherford nel 1897, per la somma delle mobilità

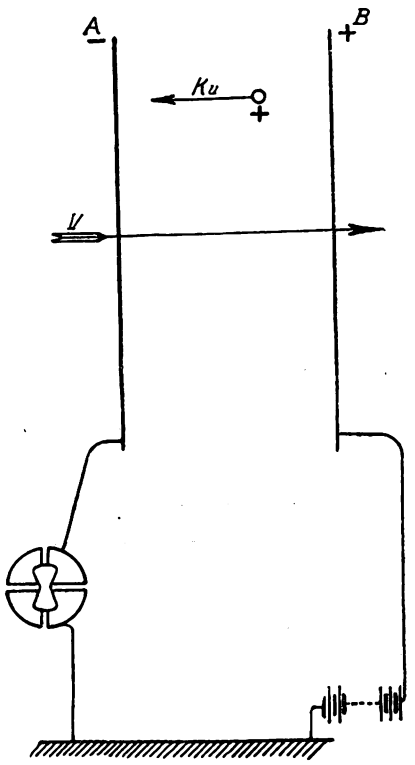


Fig. 6.

degli ioni positivi e negativi prodotti dai raggi X, e da Zeleny per il rapporto delle mobilità.

Nell'apparecchio di Zeleny (fig. 6) i due piatti paralleli A e B sono fatti di rete metallica; tra di

Digitized by Google

essi passa con velocità V, nella direzione stessa del campo, il gas, che tra A e B si trova sotto l'azione di una sorgente ionizzante. Se si applica una differenza di potenziale in modo che il campo risulti di k volta per centimetro e che il piatto B sia a potenziale più alto, gli ioni positivi vanno verso il piatto A colla velocità $ku - V$, dove u indica la loro mobilità. Se invece si stabilisce il campo di h volta per cm. diretto in senso inverso in modo che A sia a potenziale più alto, gli ioni negativi vanno verso A con una velocità eguale ad $hv - V$, dove v indica la loro mobilità (fig. 7). Si regolano i gradienti di potenziale in

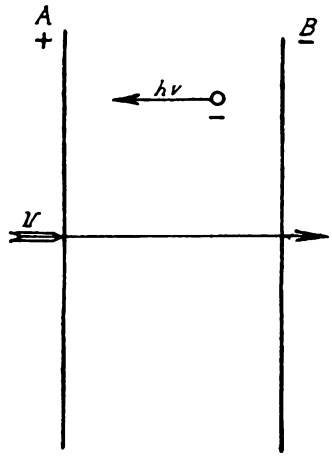


Fig. 7.

modo che siano eguali nei due casi le cariche che A riceve in un secondo, cioè siano eguali il numero degli ioni positivi e quello dei negativi, che lasciano su A la loro carica in un secondo. I numeri degli ioni che arrivano all'elettrodo sono proporzionali alle rispettive velocità: perchè sia verificata l'eguaglianza delle cariche ricevute da A nei due casi, le due velocità devono quindi essere eguali, cioè:

$$\frac{v}{u} = \frac{k}{h}$$

Zeleny trovò che la mobilità degli ioni negativi è maggiore di quella dei positivi, e precisamente che il loro rapporto per l'aria è uguale a 1,24.

I valori assoluti delle mobilità sono stati determinati più tardi da Zeleny col seguente metodo. Una corrente di gas ionizzato passa nello spazio compreso fra due tubi cilindrici coassiali (fig. 8), dei quali l'interno è diviso in due parti isolate AB e CD. Tra queste e il tubo esterno L si applica una differenza di potenziale che produce un campo elettrico radiale.

Gli ioni, che si formano nello strato ST per l'azione di una sorgente ionizzante, vengono trascinati dalla corrente gassosa in direzione dell'asse, e nello stesso tempo si spostano radialmente per effetto del campo. Quelli che sono attratti dall'elettrodo centrale vi arrivano dopo aver subito uno spostamento longitudinale che, a parità di altre condizioni, cresce colla loro distanza radiale. Gli ioni che vanno più lontano sono quindi quelli che entrano nel campo in vicinanza del tubo L; essi seguono una traiettoria come quella che nella figura comincia in P.

Se si indica con X lo spostamento longitudinale degli ioni partiti da P, K la differenza di potenziale fra i due cilindri, b il raggio del tubo esterno ed a quello del tubo interno, Q il volume del gas che passa nell'unità di tempo attraverso i due cilindri; la mobilità degli ioni che si spostano verso l'elettrodo centrale risulta

$$v = \frac{lg\left(\frac{b}{a}\right) \cdot Q}{2\pi K X} \qquad (18)$$

Si regola la differenza di potenziale K fra i due tubi al valore minimo per il quale la parte CD del tubo centrale non raccolga ioni, ciò che si può constatare mediante un elettrometro collegato con essa.

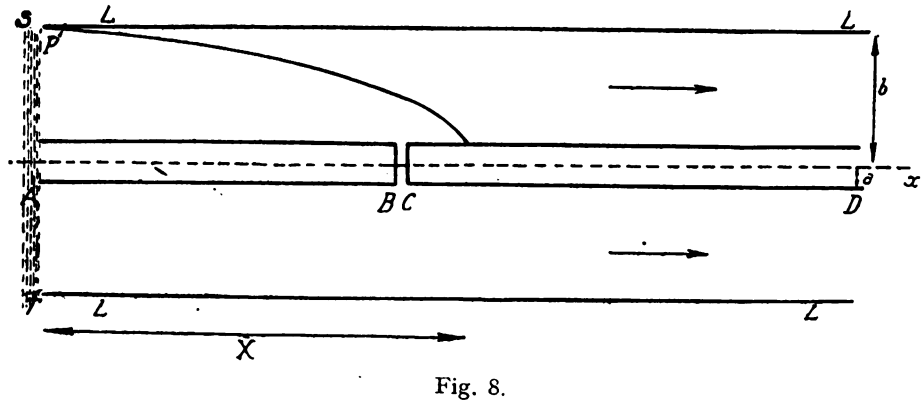


Fig. 8.

Allora è $X = \overline{AC}$: si hanno quindi tutti gli elementi per calcolare v mediante la formola (18).

Altri metodi speciali furono adoperati per la determinazione delle mobilità degli ioni prodotti nei gas da sorgenti ionizzanti diverse da quelle finora considerate.

In un metodo dovuto a Rutherford si deduce la mobilità dall'ampiezza di oscillazione degli ioni in un campo elettrostatico alternato. Questo metodo è adatto solo al caso in cui gli ioni siano tutti di un

Digitized by Google

segno ed abbiano origine in uno strato sottile del gas; e Rutherford determinò con esso la mobilità degli ioni negativi prodotti coll'irraggiamento ultravioletto di una lastra di zinco nei gas secchi alla pressione atmosferica.

In un altro metodo ideato da Chattock, adatto anche questo per ioni di un solo segno, la mobilità degli ioni prodotti da una punta si calcola misurando dentro un tubo la differenza di pressione prodotta da questi ioni, quando essi vengono spinti da un campo elettrico che si stabilisce fra la punta ed un altro elettrodo, situati dentro il tubo stesso.

I valori delle mobilità trovati da Rutherford, Zeleny, Langevin sono molto concordanti.

Sono qui riprodotti quelli di Zeleny (velocità in cm. al sec. in un campo di un volta per cm.).

	ioni positivi	ioni negativi	rapporto	temperatura
Aria secca	1,36	1,87	1,375	13°5
» umida	1,37	1,51	1,10	14°
Anidride carbonica secca	0,76	0,81	1,07	17,5
» » umida	0,81	0,75	0,915	17°
Idrogeno secco	6,70	7,95	1,19	20°
» umido	5,30	5,60	1,05	20°

Si è trovato che le mobilità degli ioni nei differenti gas stanno tra loro approssimativamente in ragione inversa della radice quadrata dei pesi molecolari, e che la velocità degli ioni entro certi limiti è inversamente proporzionale alla pressione del gas.

Carica di un ione.

Townsend fu il primo a mostrare che la carica media trasportata dagli ioni nei gas ionizzati è la stessa della carica media trasportata dagli ioni monovalenti nell'elettrolisi dei liquidi. Il prodotto del numero N delle molecole contenute in un cm.³ del gas in determinate condizioni, per es. a 15° e 76 cm. di pressione, per la carica e di un ione nei gas, si può calcolare mediante la relazione di Townsend (pag. 157) quando si conoscono i valori della mobilità u_0 e del coefficiente di diffusione D degli ioni nel gas in quelle condizioni.

La (17) quando la pressione atmosferica π è eguale a 10^6 c.g.s., diventa

$$Ne = \frac{u_0}{D} 10^6 ,$$

e quando le mobilità, sono espresse in unità assolute ma per il campo di un volta per cm.:

$$Ne = 3 \times 10^8 \frac{u_0}{D} \text{ unità elettrostatiche.}$$

Se si sostituiscono qui ad u_0 e D i rispettivi valori, e si divide per il valore del prodotto dello stesso numero N per la carica e' di un ione monovalente nelle soluzioni, valore che dalle misure elettrolitiche risulta:

$$Ne' = 1{,}225 \cdot 10^{10} \text{ unità elettrostatiche}$$

si trova che questo rapporto è poco differente dall'unità. Per gli ioni nell'aria umida (1) si ottiene ad es.:

$$\frac{e}{e'} = 1{,}04$$

Tenendo conto degli errori sperimentali che si commettono nelle determinazioni della mobilità e del coefficiente di diffusione, si può quindi affermare che le cariche e ed e' sono eguali.

Valori di questo rapporto poco differenti dall'unità sono stati ottenuti anche con altri gas: ciò porta a concludere che e ha lo stesso valore per tutti i gas.

Townsend determinò direttamente la carica di un ione col seguente metodo. L'ossigeno e l'idrogeno sviluppati nell'elettrolisi sono fortemente ionizzati positivamente o negativamente a seconda della natura dell'elettrolisi. Quando uno di questi gas entra in un ambiente saturo di umidità produce la nebbia: il vapor d'acqua si condensa in goccioline attorno agli ioni che agiscono da nuclei di condensazione. Townsend misurava:

1) la massa totale d'acqua q delle goccioline contenute in un cm.³, dall'aumento di peso di alcune sostanze essicanti colle quali filtrava la nebbia contenuta in un certo volume di gas;

2) La velocità v_1 di caduta delle goccioline, colla quale si calcola il raggio a di esse mediante la legge di Stokes:

$$v_1 = k a^2 ,$$

dove k è un coefficiente eguale ai $\frac{2}{9}$ del rapporto fra l'accelerazione di gravità ed il coefficiente di viscosità del mezzo;

3) la carica Q trasportata da un cm³. del gas ionizzato, dalla deviazione dell'ago di un elettrometro collegato con un recipiente nel quale si fa entrare una certa quantità di gas.

Queste misure forniscono tutti gli elementi per calcolare e. Difatti il numero n delle goccioline contenute in un cm.³, risulta

$$n = \frac{q}{\frac{4}{3} \pi a^3} .$$

E poichè egli ammetteva che su ogni ione si formasse una gocciolina, cioè che il numero delle goccioline fosse eguale al numero degli ioni, si ha:

$$e = \frac{Q}{n} .$$

Nel metodo di J. J. Thomson la carica media di un ione negativo si ottiene come nel metodo di Townsend dalla misura della carica totale di una grande quantità di ioni e dal numero di questi.

(1) $u_0 = 1{,}37$ e $D = 0{,}0032$ (V. pag. 157 e 159).

Digitized by Google

Dentro la camera A (fig. 9) l'aria satura di umidità e priva di pulviscolo viene ionizzata uniformemente mediante i raggi X. Un rapido abbassamento della campanella C produce una brusca espansione del gas dentro la camera A : il gas quindi si raffredda e diventa soprasaturo di umidità. Si formano allora

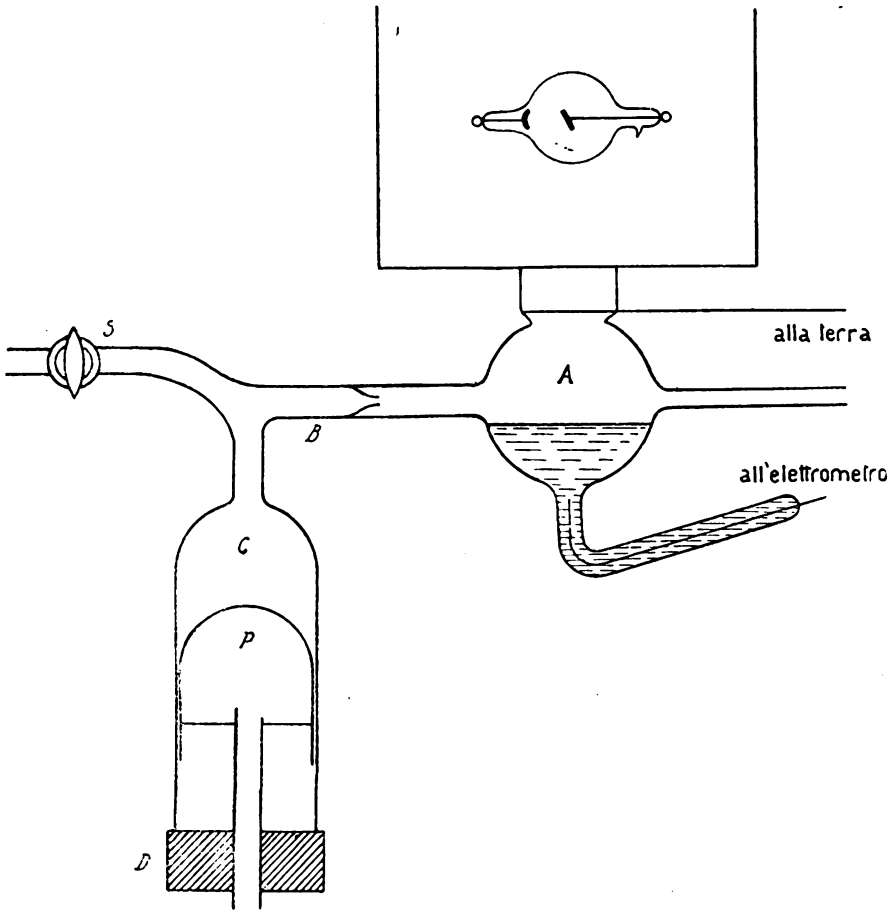


Fig. 9.

delle goccioline d'acqua intorno agli ioni poichè questi hanno la proprietà di agire da nuclei di condensazione quando il vapor d'acqua nell'aria raggiunge un certo grado di soprasaturazione. L'abbassamento della campanella C si ottiene collo stabilire repentinamente la comunicazione tra P e un recipiente nel quale l'aria si trova a pressione opportunamente ridotta.

Regolando l'espansione in modo che il rapporto dei volumi dell'aria sia compreso fra 1,25 e 1,31 la condensazione avviene soltanto sugli ioni negativi.

Anche questo metodo è fondato sull'ipotesi che, con debole ionizzazione, attorno ad ogni ione si formi una gocciolina d'acqua, e cioè che il numero degli ioni sia uguale al numero delle goccioline.

Per determinare il numero degli ioni contenuti in un cm.^{3} Thomson calcola la quantità totale di vapor d'acqua q che in seguito all'espansione si condensa in goccioline dentro un cm.^{3}, deducendola, mediante considerazioni termodinamiche, dalle condizioni iniziali dell'aria satura di vapor d'acqua (temperatura e pressione avanti l'espansione) e dal rapporto fra i volumi dell'aria prima e dopo l'espansione. Il raggio a delle goccioline viene determinato, come nel metodo di Townsend, misurando la velocità di caduta e applicando la legge di Stokes. Il numero n degli ioni contenuti in un centimetro cubo risulta quindi

$$n = \frac{q}{\frac{4}{3}\pi a^3} \qquad (20)$$

La carica totale degli n ioni viene determinata misurando la corrente trasportata dagli ioni negativi prodotti dai raggi X dentro la camera A : perciò si stabilisce una differenza di potenziale tra la superficie dell'acqua e la lastra d'alluminio che forma la parete superiore della camera A. L'intensità I della corrente attraverso l'unità di superficie dell'elettrodo è :

$$I = n e E v , \qquad (21)$$

dove E rappresenta l'intensità del campo elettrico, che deve essere piccola perchè valga la proporzionalità fra l'intensità della corrente e la forza elettrica, v la mobilità degli ioni. E sostituendo in questa relazione il valore di n dato dalla (20), si può ricavare l'espressione di e mediante quantità tutte note

Digitized by Google

$$e = \frac{4\pi a^3 I}{3 q E v} \qquad (22)$$

H. A. Wilson ha determinato la carica media di un ione dalla velocità di caduta delle goccioline formate come nel metodo di J. J. Thomson intorno agli ioni negativi, tanto sotto la sola azione della gravità quanto sotto l'azione di una forza elettrica verticale e del peso. A questo scopo nell'apparecchio di Wilson il recipiente in cui avviene la condensazione del vapore d'acqua sugli ioni è provvisto di due elettrodi piani orizzontali tra i quali si può applicare una differenza di potenziale.

colla quale si può ricavare il valore di e quando sono noti v v_1 ed X.

Nel metodo di Millikan, la determinazione di e si fa con una disposizione sperimentale analoga a quella di Wilson ; vengono osservati però i movimenti delle singole goccioline, anzichè quelli della nube, come era stato fatto negli altri metodi.

Nelle prime esperienze nelle quali il campo era regolato in modo da compensare esattamente il peso della gocciolina osservata, Millikan notò un fenomeno molto importante. Mentre osservava queste gocce sospese elettricamente, in parecchie esperienze

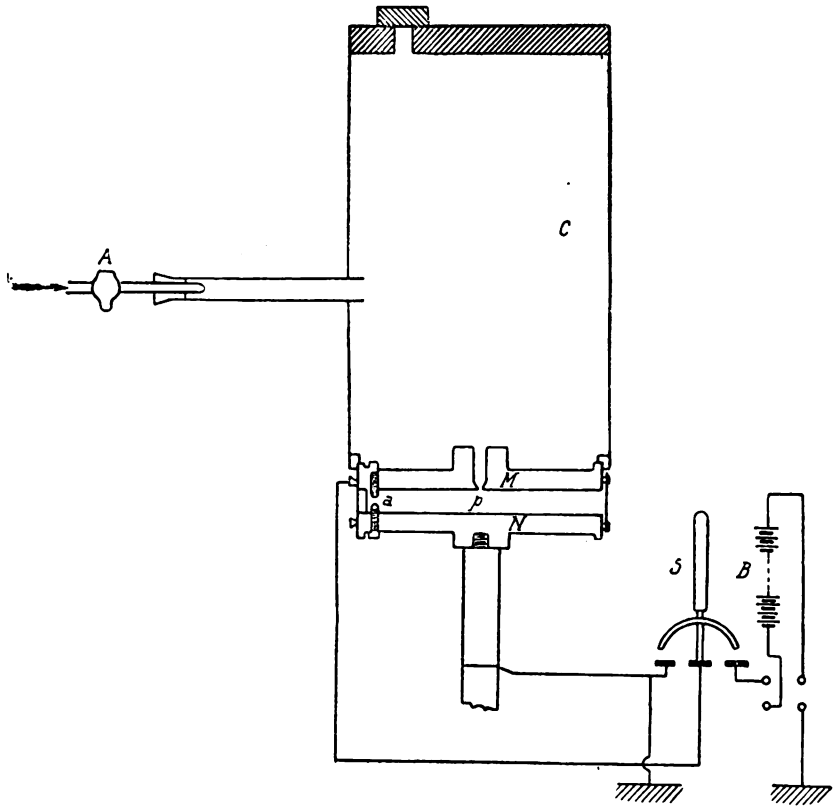


Fig. 10.

Indicando con X l'intensità del campo elettrico verticale, nel quale si trovano le gocce di raggio a e di densità ρ, e la carica di una goccia, v la velocità di caduta delle gocce, v_1 la velocità che esse assumono quando all'azione della gravità si aggiunge quella del campo elettrico, e tenendo presente che le velocità degli ioni sono proporzionali alle forze che agiscono su di essi, si può scrivere ;

$$\frac{v_1}{v} = \frac{\frac{4}{3}\pi\rho g a^3 + Xe}{\frac{4}{3}\pi\rho g a^3} \qquad (23)$$

Sostituendo ad a il valore che si ricava dalla legge di Stokes si ottiene

$$e = \frac{\sqrt{2}}{X} 9\pi \sqrt{\frac{\mu^3}{g\rho}} \frac{v\frac{3}{2}(v^1 - v)}{v} \qquad (24)$$

nelle quali aveva tralasciato di togliere la sorgente ionizzante dopo avvenuta l'espansione, potè accorgersi che qualche goccia cambiava bruscamente la sua carica perchè acquistava un movimento verso l'alto o verso il basso : ciò avveniva in seguito alla cattura di un ione positivo o negativo.

Millikan trasse notevole profitto da questo fatto, che rese possibile la misura della carica degli ioni atmosferici senza bisogno di far avvenire la condensazione su di essi. Egli faceva percorrere ad una goccia carica, interamente esente da evaporazione, lo spazio compreso tra i due piatti di un condensatore piano orizzontale ad aria, in su e in giù alternativamente, mettendo e togliendo il campo elettrico che era regolato in modo da produrre una forza maggiore del peso della goccia. La variazione della velocità di ascensione che avviene in seguito alla cattura di un ione atmosferico è esattamente proporzionale alla carica dell'ione catturato ; dunque

Digitized by Google

misurando la velocità della stessa goccia sotto l'azione di un campo elettrico costante, prima e dopo la cattura di qualche ione, e facendo la differenza fra i valori trovati, si ottiene una quantità che è proporzionale alla somma delle cariche degli ioni catturati, e in base alla quale il confronto fra le cariche catturate si rende indipendente dalle proprietà della goccia e del mezzo.

Millikan ha comparato le cariche dei diversi ioni con l'apparecchio rappresentato dalla fig. 10. Nella camera C entra un getto di minutissime goccioline d'olio, prodotte mediante uno spruzzatore. Qualcuna di queste goccioline riesce a penetrare attraverso al forellino p nel condensatore costituito dai due piatti circolari di ottone N e M del diametro di 22 cm., uno dei quali, N, è in comunicazione col suolo, mentre quello più alto, che ha nel centro il forellino p, è isolato: le due faccie piane di M e N sono alla distanza di 16 mm. Il commutatore S stabilisce la comunicazione del piatto isolato coll'estremo di una batteria B di accumulatori a 10.000 volta, l'altro estremo della quale è a terra, oppure chiude in corto circuito i due piatti.

Un fascio luminoso molto potente entra per una delle due finestre a praticate nella fascia isolante che chiude lateralmente il condensatore ed illumina intensamente le goccioline che si trovano tra i due piatti del condensatore. Queste si osservano mediante un cannocchiale con obiettivo a corto fuoco, attraverso ad una terza finestra praticata come le a ma dalla parte di chi guarda la figura, in modo che la visuale sia perpendicolare al percorso dei raggi illuminati.

Le radiazioni ionizzanti, raggi X o raggi γ, penetrano attraverso la seconda finestra a, che è chiusa come le altre con una lastrina di vetro. Mediante diaframmi di piombo si può ottenere che le radiazioni non colpiscano le gocce in esame, ma ionizzino soltanto lo strato del gas che sta al disotto di quello in cui le goccioline compiono le escursioni verticali.

Le goccioline che penetrano nel condensatore possiedono quasi sempre una forte carica elettrica acquistata nello spruzzatore; quindi quando si stabilisce il campo elettrico, nel senso giusto e di sufficiente intensità, la goccia sale verso il piatto superiore M. Prima che essa lo raggiunga, si chiudono in corto circuito i piatti mediante il commutatore S ed allora la goccia cade per il suo peso, ma quando essa è vicina a N si ristabilisce il campo ed essa ritorna a salire, e così via.

Si misurano i tempi che occorrono perchè nel campo del cannocchiale l'imagine della goccia percorra l'intervallo limitato da due fili del reticolo, al quale intervallo corrisponde nel condensatore un escursione verticale effettiva della goccia di 0,5222 centimetri.

Ripetendo molte volte la misura su una stessa goccia si osserva che, mentre i tempi di caduta rimangono costanti, quelli di sollevamento di tanto in tanto cambiano per la cattura di qualche ione (1).

(1) Le variazioni della carica di un a goccia avvengono quasi esclusivamente durante la caduta, poichè quando agisce il campo elettrico, che è molto forte, gli ioni vanno sugli elettrodi con grande rapidità e quindi la loro concentrazione è molto piccola.

Indicando con v_1, la velocità di caduta della goccia di massa m in assenza del campo, con v_2 quella di sollevamento sotto l'azione del campo di intensità F, e con e_n la carica della goccia si ha, ammettendo la proporzionalità tra le forze e le velocità:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{mg}{Fe_n - mg} \qquad (25)$$

e quindi

$$e_n = \frac{mg}{Fv_1}(v_1 + v_2) \qquad (26)$$

Quando avviene la cattura di uno o più ioni la carica della goccia cambia: indichiamo con e_i la carica catturata, $e_n{}^1$ la carica che ora ha la goccia, v'_2 la nuova velocità che essa assume nel campo, sarà:

$$e_i = e_n{}^1 - e_n = \frac{mg}{Fv_1}(v'_2 - v_2)$$

Il fattore $\frac{mg}{Fv_1}$ è costante, quindi le cariche catturate da una goccia sono proporzionali alle corrispondenti variazioni della sua velocità $(v'_2 - v_2)$.

Nella seguente tabella sono riportati alcuni risultati trovati da Millikan; a sinistra si trovano i successivi valori della velocità di salita v_2 della stessa goccia nel campo elettrico, ed a destra le differenze di velocità, cioè i numeri proporzionali alle cariche catturate.

v_2	Δv_2,
$\frac{0{,}5222}{12{,}45} = 0{,}04196$	
	$0{,}01806 = 0{,}00903 \times 2$
$\frac{0{,}5222}{21.5} = 0{,}02390$	
	$0{,}00885 = 0{,}00885 \times 1$
$\frac{0{,}5222}{34.7} = 0{,}01505$	
	$0{,}00891 = 0{,}00891 \times 1$
$\frac{0{,}5222}{85.0} = 0{,}006144$	
	$0{,}00891 = 0{,}00891 \times 1$
$\frac{0{,}5222}{34.7} = 0{,}01505$	
	$0{,}01759 = 0{,}00880 \times 2$
$\frac{0{,}5222}{16.0} = 0{,}03264$	
	$0{,}01759 = 0{,}00880 \times 2$
$\frac{0{,}5222}{34.7} = 0{,}01505$	
	$0{,}00891 = 0{,}00891 \times 1$
$\frac{0{,}5222}{21{,}85} = 0{,}02390$	

Digitized by Google

Dall'ultima colonna si vede che le cariche catturate hanno, entro i limiti degli errori che risultano dalla determinazione del tempo con un cronografo, in quattro casi esattamente lo stesso valore, e negli altri tre un valore doppio.

Relazioni analoghe, anche con cariche più forti, sono state trovate da Millikan nell'osservazione della cattura di parecchie migliaia di ioni in condizioni assolutamente differenti per la natura del gas e per la sostanza delle goccioline (1) ed in nessun caso la variazione della velocità aveva un valore che non fosse eguale a quello corrispondente alla più piccola carica catturata o ad un piccolo multiplo esatto di essa, tanto per gli ioni positivi quanto per i negativi.

Millikan calcolò quindi il valore della carica e, che corrisponde per ogni goccia ad una variazione di velocità eguale al massimo comun divisore delle variazioni osservate.

La relazione (26) diventa, quando si fa

$$m = \frac{4}{3}\,\pi\, a^3\,(\sigma - \rho), \qquad (27)$$

e si sostituisce il valore di a ricavato dalla legge di Stokes

$$v_1 = \frac{2\,g\,a^2}{9\,\mu}\,(\sigma - \rho), \qquad (28)$$

si ottiene:

$$e_n = \frac{4\pi}{3}\left(\frac{9\mu}{2}\right)^{\frac{3}{2}}\left[\frac{1}{g\,(\sigma-\rho)}\right]^{\frac{1}{2}}\left(\frac{v_1+v_2}{F}\right)v_1^{\frac{1}{2}} \qquad (29)$$

(1) Furono provate goccioline di mercurio, e sferette di alluminio, zolfo, ceralacca, ottenute piccolissime mediante vari artifizi.

μ indica la viscosità e ρ la densità del mezzo, a il raggio e σ la densità della goccia.

Sostituendo in questa il massimo comun divisore di tutte le serie di valori osservati di v_1+v_2 o di $v'_2 - v_2$ si ottiene il valore di e.

Durante lo studio accurato delle varie cause d'errore, fatto allo scopo di raggiungere col suo metodo la massima precisione, Millikan trovò che la legge di Stokes non è più valida quando le gocce sono molto piccole, e precisamente quando non si può ammettere che esse siano molto più grandi del medio cammino libero l del gas.

Nella legge di caduta venne quindi introdotta una correzione, dedotta teoricamente da Cunninghan, per cui si ha:

$$v_1 = \frac{2}{9}\,\frac{g\,a^2}{\mu}\,(\sigma - \rho)\left(1 + A\,\frac{l}{a}\right)$$

dove A è una costante.

I valori di e ottenuti coi principali metodi avanti descritti sono i seguenti:

Townsend	1898	1,5-2,9 . 10^{-10}	unità elettrostat.
J. J. Thomson	1898	6,6 . 10^{-10}	»
» »	1903	3,4 . 10^{-10}	»
Wilson	1905	3,1 . 10^{-10}	»

Il valore che oggi si può ritenere più attendibile è quello ottenuto da Millikan nel 1916 in seguito a misure di grande precisione:

$e = (4{,}774 \pm 0{,}005).10^{-10}$ unità elettrostatiche.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. ALESSANDRO AMERIO

ISTITUTO FISICO R. UNIVERSITÀ DI PAVIA

ARCO VOLTAICO E FORNO ELETTRICO

Digitized by Google

Digitized by Google

ARCO VOLTAICO

1. - *Premessa storica.*

Fra le numerose scoperte che furono fatte in seguito all'invenzione della pila di Volta, una fu dedicata in modo speciale al grande Fisico, dandole il suo nome, ed è *l'arco voltaico.*

Per lo più, la scoperta viene attribuita a Humphry Davy, tanto che si sente spesso dire arco di Davy, perchè pare che egli lo abbia ottenuto la prima volta nel 1801, ma già molto tempo prima che egli lo descrivesse, veniva prodotto per brevi istanti, come una scintilla nutrita e prolungata, all'interruzione del circuito, e nel 1803 ne parlò il fisico russo Petroff, che fin dal 1802, cioè poco dopo l'invenzione del Volta (1800), lo ottenne mediante una potente batteria di pile.

Si tratta probabilmente di una di quelle scoperte che vennero fatte da più persone, indipendentemente l'una dall'altra e quasi contemporaneamente.

Il Davy lo produsse di notevole lunghezza, nel 1808, tra elettrodi di carbone di legna, mediante una pila di ben 2000 elementi voltaici, e lo studiò anche in aria rarefatta.

2. - *Produzione e aspetto dell'arco.*

Comunemente l'arco si ottiene quando si disponga di una batteria di pile con una f. e. m. di una sessantina di volt e una resistenza aggiunta di alcuni ohm, portando prima a contatto due carboni di storta che servono a chiudere il circuito; nel punto di contatto si stabilisce una vivace ignizione, e scostandoli fra di loro di qualche millimetro, la corrente continua a passare attraverso all'aria (figura 1); le due estremità affacciate diventano brillanti quasi quanto il sole, e tra esse un magnifico arco violaceo, molto più pallido, sebbene il suo splendore sia paragonabile a quello di una lampadina a incandescenza, fa da conduttore alla corrente elettrica. Esso è costituito da vapori di carbonio a temperatura elevatissima.

Analogo fenomeno si ottiene fra due elettrodi metallici, o fra un elettrodo di carbone e un metallo, o fra un elettrolita e un metallo, purchè si disponga di tensioni sufficienti, con differenze notevoli da caso a caso.

Ritorniamo all'arco fra carboni, che è il più studiato.

Se gli elettrodi sono disposti orizzontalmente, sul prolungamento l'uno dell'altro, l'arco, per effetto termico, viene leggermente soffiato verso l'alto e poichè rimane attaccato ai due estremi brillanti dei carboni, s'incurva con la convessità verso l'alto. Di qui il nome, esteso poi a tutto l'insieme.

A poco poco i due carboni, anche se in origine perfettamente uguali, si differenziano: il positivo si scava a cratere circolare, talora anche molto profondo; il negativo si foggia a punta, e l'arco parte da una piccola regione molto brillante di questa,

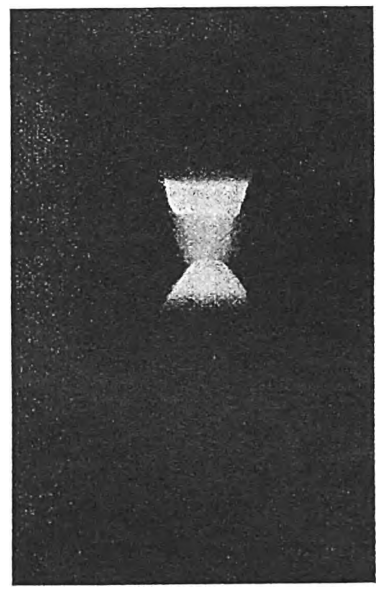


Fig. 1.

e allargandosi va a terminare alla superficie notevolmente maggiore, e più splendente, del cratere positivo.

Lo splendore dell'insieme è così grande che, anche attualmente, l'arco è la sorgente continua e più brillante di luce di cui disponiamo dopo del Sole.

3. - *Caratteristiche elettriche.*

Le caratteristiche elettriche dell'arco sono veramente rimarchevoli.

Esse collegano i valori delle tensioni applicate agli

Digitized by Google

estremi affacciati degli elettrodi (e), con le intensità delle correnti (i), e con le lunghezze dell'arco (l), per dati elettrodi, e sono di due tipi: statiche e dinamiche.

Nelle caratteristiche statiche si studia il fenomeno dell'arco disponendo di f. e. m. costanti e misurando le intensità delle correnti che si ottengono per le varie lunghezze dell'arco e tra elettrodi di date specie. Nelle caratteristiche dinamiche si studiano le variazioni della corrente dovute alle rapide variazioni della tensione alimentatrice, come avviene durante un periodo di una corrente alternata.

a) *Caratteristiche statiche.* – Per queste Herta Ayrton trovò sperimentalmente le relazioni indicate dagli annessi diagrammi (fig. 2).

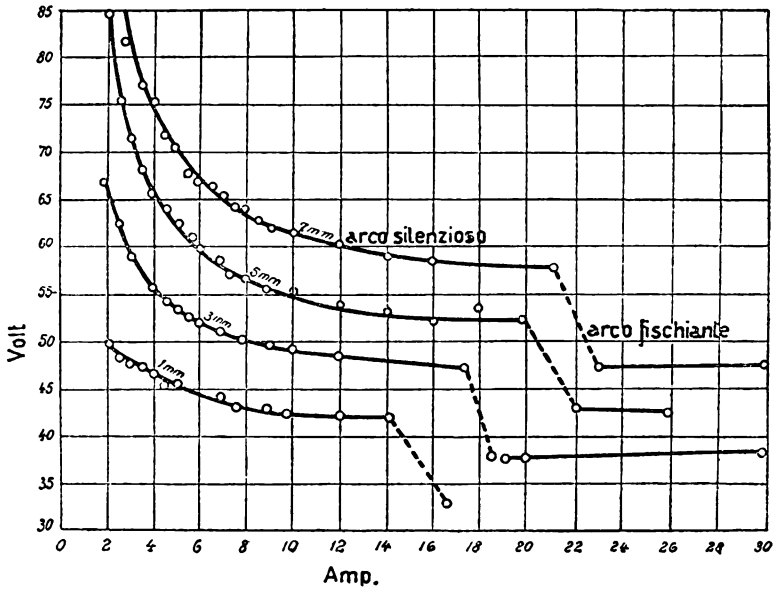


Fig. 2.

Esse sono ben rappresentate dalla formula

$$(1) \qquad e = a + bl + \frac{c + dl}{i},$$

dove $a, b. c, d$ sono delle costanti che dipendono dalla natura degli elettrodi, dal gas ambiente e dalla pressione di questo.

Si vede dalla formula (1), come dai diagrammi, che:

1) Se manteniamo i costante, e cresce proporzionalmente ad l;

2) Se manteniamo e costante, l cresce con l'intensità i della corrente;

3) Se infine manteniamo l costante, e decresce al crescere di i.

Nel primo caso, per i *costante*, la (1) può essere scritta

$$e = A + Bl$$

o anche

$$(2) \qquad \frac{e}{i} = \alpha + \beta l$$

dove α e β sono costanti; questa caratteristica era già stata data da Edlund fin dal 1867, e nel secondo membro contiene la *resistenza apparente dell'arco per corrente costante.* Si vede facilmente che questa resistenza è tanto minore quanto maggiore è l'intensità della corrente perchè α e β diminuiscono al crescere di i.

Pel secondo caso possiamo dire che mentre con una sessantina di volt, se la corrente è di 6 amp. abbiamo un arco lungo 5 mm., se è di 12 amp. la lunghezza è di 7 mm.; quando la corrente sia di migliaia di ampère come si usa nei forni elettrici, pure rimanendo inalterata la tensione, la lunghezza può giungere a parecchi cm.

Nell'ultimo caso, cioè per l costante, la relazione (1) si trasforma nella

$$(3) \qquad e = A + \frac{B}{i},$$

dove A e B sono delle costanti che dipendono, oltre che dalla natura degli elettrodi e del gas ambiente, dalla pressione di questo e anche dalla lunghezza dell'arco.

La formula della Ayrton, che è la più generale, ebbe numerose e buone conferme per correnti intense, tra le quali cito di recenti quelle di Duddel e quelle di Granqvist, come pure per correnti debolissime da Grotrian e, recentemente da Malcolm, per archi tra elettrodi di carbone, nell'aria o in parecchi altri gas.

Forse con minor esattezza essa rappresenta come vanno le cose tra elettrodi metallici, ma nel complesso si può ritenere che essa colleghi abbastanza bene gli elementi degli archi, purchè questi non si trovino in condizioni eccezionali.

I coefficienti a, b, c, d, sono stati determinati dalla Ayrton e da numerosi fisici per molte specie di carboni e molti metalli dell'aria e in vari altri gas, come idrogeno, anidride carbonica, vapor d'acqua ecc., per

Digitized by Google

lunghezze di archi variabili da 1 mm. a 50 cm. e per correnti crescenti da un decimo sino a parecchie decine di ampère.

L'ultima formula ci dice molto chiaramente che al diminuire di e cresce i, ossia che la legge di Ohm non è seguita dall'arco voltaico.

La curva che la rappresenta in assi coordinati ortogonali, aventi per ascisse le i e per ordinate le e, è un'iperbole equilatera che ha per assintoti l'asse delle ordinate e una parallela all'asse delle ascisse, condotta alla distanza A.

La (3) può anche essere scritta

$$ie = Ai + B = w,$$

da cui si vede che la potenza w consumata in un arco varia in proporzione dell'intensità della corrente; e la curva che la rappresenta in assi cartesiani ortogonali, aventi per ascisse le i e per ordinate le potenze w, è una retta che taglia l'asse delle potenze nel punto di ordinata B, come se l'arco consumasse potenza anche per $i = 0$. Ciò si spiega pensando che in un arco di lunghezza data, al diminuire della corrente i, cresce la tensione e applicata.

Varie sono le relazioni che sono state proposte in sostituzione della (1) allo scopo di diminuire le costanti necessarie, ma nessuna, in fondo, va altrettanto bene.

Interessante è una di esse, di forma analoga alla (1), ma d'importanza più generale, che è stata data da Nottingham, la quale però contiene una costante in più.

Questi avrebbe trovato che in archi tra elettrodi di qualsiasi specie, la i che comparisce nella formula della Ayrton (1), va elevata ad un certo esponente variabile n, affinchè essa rappresenti meglio questo fenomeno in ogni caso.

Nel caso particolare di archi di eguale lunghezza essa diventa:

$$(5) \quad e = A + \frac{B}{i^n},$$

dove è importante notare che, come dice la (fig. 3), l'esponente n è proporzionale alla temperatura assoluta T alla quale bolle l'anodo, e precisamente:

$$(6) \quad n = 2{,}64 . 10^{-4}\, T.$$

Il valore di n sperimentato, va da 0.345 per lo zinco ($T = 1180$), a 1,38 per il tungsteno ($T = 5100$).

La (5) si trasforma subito nella

$$(7) \quad \log (e - A) = \log B - n \log i,$$

cioè, per una data lunghezza dell'arco, i punti determinati da $\log (e - A)$, per vari valori di $\log i$, stanno in linea retta, in un sistema di assi coordinati ortogonali, aventi $\log (e - A)$ per ordinate e $\log i$ per ascisse.

È bene osservare che la (6), per il carbone, dà quasi esattamente $n = 1$, indicando che la formula della Ayrton è un caso particolare di quella più generale di Nottingham, valida per tutti gli elettrodi.

Anche questa formula più generale ci dice che, come già per l'arco tra elettrodi di carbone, qualunque sia la natura degli elettrodi, per ogni lunghezza determinata dell'arco, al crescere della corrente diminuisce la tensione applicata, vale a dire che la *legge di Ohm non è seguita in nessun caso.*

Se agli estremi dell'arco esiste la differenza di potenziale e, la (5) dice che per ogni variazione di corrente di, c'è una variazione de nella tensione, che è data da

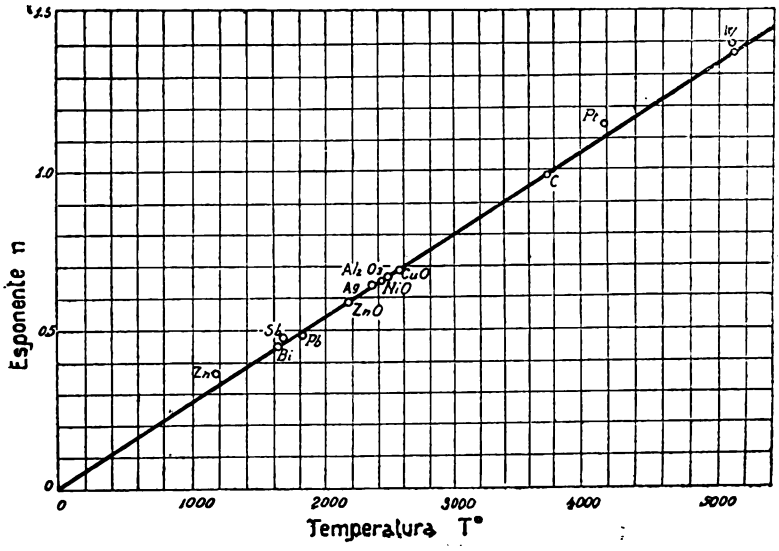


Fig. 3.

$$(7) \quad de = - \frac{n B}{i^{n+1}}\, di.$$

Ma nelle ordinarie applicazioni della legge di Ohm, detta r la resistenza, si ha

$$de = r\, di,$$

ossia l'arco funziona come una resistenza negativa di valore

$$- \frac{n B}{i^{n+1}},$$

Digitized by Google

che è l'espressione (per l costante) di ciò che si dice la *resistenza apparente dell'arco* per condizioni variabili, di tensione e di corrente.

Per conseguenza, se si suppone che nel circuito non sia inserita alcuna resistenza, una eventuale diminuzione di corrente non provoca in alcuna parte del circuito stesso, una diminuzione di caduta ohmica che possa aumentare la tensione agli elettrodi, in modo da mantenere le condizioni dell'arco sulla caratteristica che gli corrisponde; perciò essa continua fino a che l'arco non si spenga.

L'arco è dunque *instabile*. Per avere un arco stabile di una data lunghezza, per es. 5 mm., bisogna mantenere le condizioni elettriche che sono date dalla caratteristica corrispondente a questa lunghezza (v. fig. 2).

Perciò se i aumenta, e deve diminuire di una quantità corrispondente, per es. se i passa da 4 a 5 ampère, e deve passare da 67 a 63 volt, e ciò è possibile solo quando in serie con l'arco ci sia una resistenza opportuna, detta resistenza *zavorra*.

In questo caso detta E la f. e. m. disponibile ed R la resistenza aggiunta, si ha

$$E = Ri + c$$

e per una variazione $+ di$ della corrente, sarà:

$$R\,di + de = 0$$

ossia la variazione de della tensione applicata agli estremi affacciati dell'arco sarà: $-R\,di$.

Volendo che il nuovo punto si trovi sulla caratteristica, poichè sappiamo per la (7) che

$$de = -\frac{nB}{i^{n+1}}\,di,$$

dovrà essere

$$R = \frac{nB}{i^{n+1}}.$$

Nel caso dell'arco tra elettrodi di carbone, poichè $n = 1$, viene

$$R = \frac{B}{i^2},$$

formula data già da Silvanus Thomson.

b) *Caratteristiche dinamiche* – Le caratteristiche dinamiche sono ricavate sperimentalmente per mezzo degli oscillografi, uno dei quali, molto adatto, è il tubo di Braun.

Si abbia un circuito derivato sull'arco e uno in serie con lo stesso, oppure derivato su un tratto della resistenza ohmica posta in serie coll'arco, e si alimenti questo con una corrente alternata. Il primo sarà percorso da una corrente in fase con la tensione alimentatrice e d'intensità proporzionale alla stessa; il secondo da una corrente proporzionale alla corrente dell'arco e in fase con essa.

Supponiamo che i due circuiti agiscano sul fascetto catodico del tubo di Braun in direzioni perpendicolari tra di loro e alla direzione del fascetto. Quando agisce uno solo di essi, il fascetto devierà e la sua traccia luminosa sullo schermo fluorescente sarà rettilinea. Le due tracce ottenute separatamente saranno rettilinee e perpendicolari.

Supposto che agiscano contemporaneamente, è ovvio che la macchia luminosa descriverebbe la diagonale tra le due tracce precedenti, qualora le azioni fossero tra di loro proporzionali in tutti i tempi.

Invece essa descrive un diagramma del tipo che si vede nella figura 4.

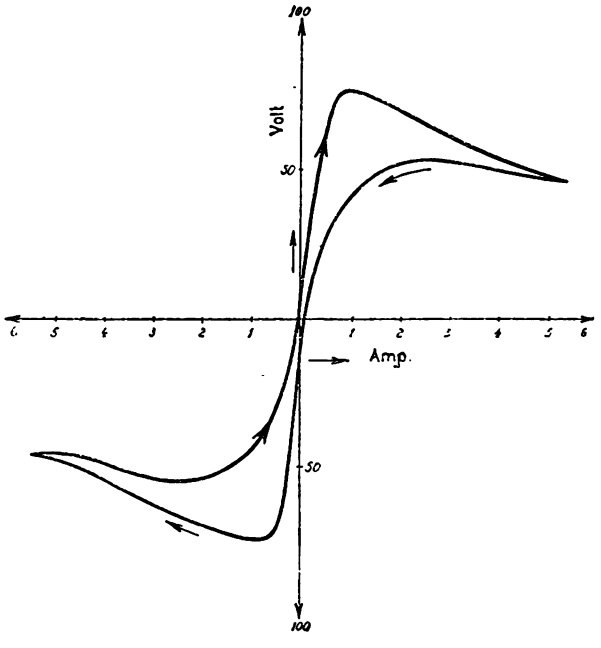


Fig. 4.

In questa si vede che per tensioni crescenti la corrente ha sempre una intensità minore che per pari valori delle tensioni decrescenti.

Ciò si spiega facilmente, sia, un po' grossolanamente, pensando che durante la diminuzione della tensione, il gas e gli elettrodi sono più caldi che durante la fase di aumento, e che in conseguenza la resistenza che incontra la corrente nell'arco è minore; sia, più esattamente, in base alla teoria dell'arco che vedremo al N. 8.

La curva tracciata ci dà la cosidetta *isteresi dell'arco*.

Con un oscillografo, derivando le correnti come dianzi, si ottengono le curve EI della figura 5, dalla quale si rileva che quando la tensione E dallo zero comincia a crescere, la corrente I è debole, ma poi rapidamente aumenta, e continua a crescere anche quando la tensione ha cominciato a diminuire, per annullarsi poi press'a poco con la tensione stessa.

Il Simon ha dato una teoria dell'arco alimentato da corrente alternata, in cui si prende come un parametro caratteristico dell'arco il prodotto della temperatura assoluta T del catodo, per l'area S di quella parte di questo che forma la base dell'arco. Se si indica con a il calore eliminato attraverso a

Digitized by Google

quest'area per l'unità di questo prodotto, il Simon trova pei valori istantanei l'equazione

$$(8) \quad e\,i = a\,(TS) + L\frac{d\,(TS)}{di},$$

dove L è un coefficiente proporzionale alla densità del materiale che costituisce l'arco, al suo calore specifico, e inversamente proporzionale alla conducibilità termica.

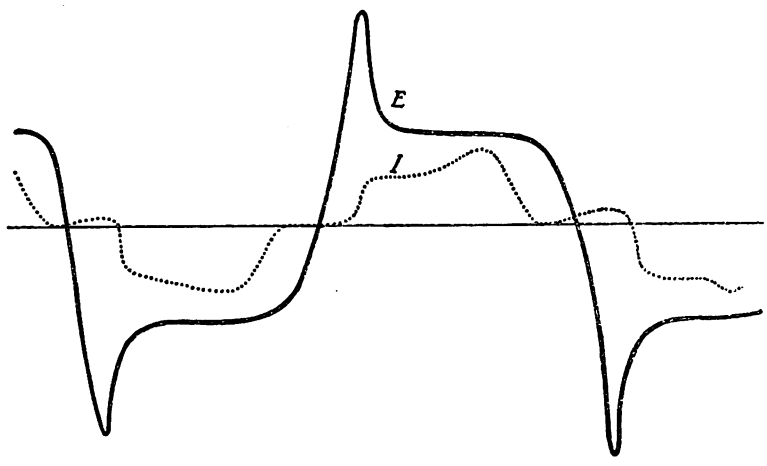


Fig. 5.

4. - *Arco fischiante.*

Le caratteristiche statiche della figura 2 sono costituite da due parti: quella sinora esaminata corrisponde ai tratti descrescenti delle curve e l'arco vi è stabile e silenzioso. Se si aumenta la corrente, e l'arco è nell'aria, a un certo punto si verifica un brusco cambiamento di regime: la tensione diminuisce di una decina di volt, nello stesso tempo la corrente aumenta di due o tre ampère, l'arco incomincia a fischiare, la luce irradiata diminuisce sensibilmente e diventa rapidamente pulsante. In queste condizioni il vapore di carbonio non protegge più il cratere positivo dall'ossidazione, il consumo di questo carbone si fa più irregolare, la punta del negativo si foggia a fungo e l'arco diventa irrequieto. Se l'arco avviene in atmosfera priva di ossigeno esso non fischia.

5. - *Cadute di potenziale.*

L'apparente resistenza dell'arco è dovuta a varie cause, che dal più al meno si presentano in tutti gli archi, qualunque sia la natura degli elettrodi e le loro condizioni.

La formula della Ayrton per $l = 0$ e $i = 1$, ci dà

$$E = a + c.$$

È dunque necessaria una differenza di potenziale finita anche per mantenere un arco di lunghezza infinitesima. Questa differenza è costituita da due parti che si possono rendere palesi sperimentalmente, ed è la causa per cui non si può accendere un arco disponendo di una f.e.m. inferiore a un certo limite.

Dapprima si attribuiva questo fatto all'esistenza di una speciale forza contro elettromotrice, analoga alla f.e.m. di polarizzazione, ma molto maggiore di essa. Edlund, che ne fece lo studio, era giunto per le sue misure ad attribuirle il valore di 45 volt circa, per elettrodi di carbone nell'aria.

Ma, contrariamente a quanto avviene per le f.e.m. di polarizzazione, di essa non si trova alcuna traccia appena si elimini la batteria alimentatrice dell'arco. Numerose ed accurate ricerche, tra cui quelle di Corbino e Liga, hanno fatto lasciare da parte per molto tempo questa idea, sostituendola con quella di speciali cadute di potenziale, di natura differente dall'ordinaria caduta ohmica, e localizzate nelle immediate vicinanze degli elettrodi.

Se misuriamo le differenze di potenziale che si manifestano fra le varie parti di un arco voltaico, troviamo che allorquando si passa dal cratere positivo all'arco, in un intervallo piccolissimo, dell'ordine delle escursioni libere molecolari, si manifesta una notevole caduta di tensione, la quale dipende dalle condizioni dell'arco; per es. se questo avviene tra carboni nell'aria, è lungo 2 mm. ed è percorso da 10 amp., la caduta misurata è di 32,5 volt e in generale è

$$e_a = 31.28 + \frac{9 + 3.1\,l}{i}.$$

Passando da un punto vicinissimo alla parte più luminosa del catodo, al catodo stesso, troviamo un altro salto, nello stesso senso, ma per lo più minore, che nel caso precedente è di circa 9 volt e dipende anch'esso dalle condizioni dell'arco, secondo la relazione:

$$e_c = 7.6 + \frac{13.6}{i}.$$

Lo spazio nel quale si manifesta questa seconda ca-

Digitized by Google

duta è dell'ordine dell'escursione libera di un elettrone nel gas. Tra questi due salti, lungo l'arco, si manifesta per lo più una graduale discesa dei potenziali, andando dal positivo al negativo.

Però secondo il Duddel, questo modo di considerare le cose è alquanto semplicista. Dalle sue ricerche, che furono confermate anche recentemente, da Hagenbach e Wehrle, derivano effettivamente delle vere *f. contro e. m.* di natura speciale, e le due cadute di potenziale agli elettrodi sono accompagnate da due f.e.m., una anodica, contraria, e una catodica, del senso della tensione applicata.

I valori dati precedentemente sarebbero le somme algebriche delle vere cadute di potenziale e delle *f. contro e. m.* di Duddel.

Ad ogni modo, qualunque sia l'interpretazione, per ottenere un arco occorre che la tensione applicata agli elettrodi superi la somma delle due brusche cadute di potenziale sopradette.

Le cause dell'apparente resistenza negativa dell'arco sono due: 1°. Che queste due brusche cadute di potenziale *diminuiscono al crescere della corrente.* 2°. Che sebbene l'arco compreso fra i punti in cui esse si manifestano, presenti una caduta ohmica, neanche in questo tratto esso si comporta come un comune conduttore, perchè la sua resistenza diminuisce col crescere dell'intensità della corrente. Perciò per compensare queste variazioni, occorre aggiungere una conveniente resistenza per zavorra, allo scopo di ottenere la stabilizzazione dell'arco.

In questi ultimi tempi sono state molto studiate le condizioni degli archi con elettrodi di mercurio, che avvengono in atmosfere rarefatte, alimentandoli con piccole tensioni.

Tra i risultati ottenuti c'è da osservare che mentre può mancare la caduta anodica, *è sempre presente la caduta catodica;* anzi in alcuni di questi archi si è trovata una caduta anodica di senso opposto all'ordinario e dell'ammontare di parecchi volt, vale a dire che a partire dal positivo e fino quasi al negativo, il potenziale sale in luogo di scendere.

Con questi archi che sono mantenuti con soli 5 volt di tensione ai poli, in atmosfera rarefatta di elio, di argo o di vapore di mercurio, si è riscontrata talvolta una caduta catodica di circa 11,5 volt. Ciò significa che partendo dall'anodo, il potenziale anzichè scendere, *sale* di 6 volt, per poi scendere precipitosamente di 11,5 presso al catodo. Nello spazio nel quale il campo è invertito, la corrente elettrica va in direzione opposta alla forza elettrica; ciò è dovuto all'effetto prodotto dal campo nel tratto in cui c'è il maggior salto, cioè vicino al catodo, nello stesso modo che un grave può salire ad una certa altezza se, con una discesa alquanto maggiore ha acquistata la necessaria velocità.

6. - *Archi a vapore di mercurio.*

Altrettanto interessante quanto l'arco tra elettrodi di carbone è quello a vapori di mercurio, tra elettrodi che possono essere entrambi di mercurio, oppure uno di mercurio e l'altro di ferro, di nichel, di platino, tungsteno, ecc. dove però il mercurio funziona sempre da catodo.

Gli elettrodi sono saldati a un tubo di vetro o di quarzo contenente del mercurio, nel quale si fa il vuoto.

Per adescarlo si hanno vari metodi. Per es. si possono mettere gli elettrodi in comunicazione mediante il mercurio stesso, inclinando opportunamente il tubo, con che si forma un filetto conduttore tra gli elettrodi; poscia si rompe il filetto, raddrizzando il tubo.

La corrente non cessa perchè l'arco si stabilisce attraverso all'interruzione, anche se questa è della lunghezza di vari decimetri; l'adescamento può anche avvenire facendo scoccare una scintilla elettrica fra gli elettrodi, o scaldando sufficientemente un punto del catodo di mercurio con un arco ausiliario.

Nell'arco a vapore di mercurio si nota, al catodo, una macchietta luminosissima e mobile, da cui parte un fascio luminoso che va a raggiungere l'anodo, mentre questo si mantiene oscuro.

Le temperature dell'anodo e del catodo si mantengono sempre basse e la luminosità proviene tutta dall'arco; ma anche lungo questo, la temperatura si mantiene sempre molto inferiore al valore che dovrebbe avere se l'emissione fosse dovuta ad essa. Questa temperatura è massima lungo l'asse dell'anodo verso il catodo, dipende poco dall'intensità della corrente, ed è proporzionale alla tensione applicata.

Anche in questo arco si hanno, come in tutti gli altri, le due cadute di tensione agli elettrodi, una caduta di natura ohmica lungo il fascio luminoso, e vale la nota formula dell'Ayrton.

Secondo Stark negli archi a bassa tensione da lui studiati, si presenta al catodo una caduta di tensione di 5,27 volt, quasi costante; la caduta anodica è più variabile con l'intensità della corrente e dipende dalla natura dell'anodo, passando da 4,7 volt, per anodo di grafite, a 7 per anodo di mercurio quando la corrente è di 3 ampère.

Se la corrente cresce da 3 a 6, la caduta anodica passa da 7 a 7,4 e dipende inoltre molto dalla temperatura dell'anodo, giungendo a oltre 13,6, con anodo di ferro riscaldato fino al color giallo.

Le caratteristiche elettriche di questi archi hanno andamento analogo a quello dell'arco fra carboni, in conseguenza, per ottenere la stabilità occorre l'aggiunta di una certa resistenza.

In quanto alla luce emessa bisogna osservare:

1. al catodo essa è limitata alla piccolissima macchia vagante da cui parte l'arco;

2. all'anodo è nulla;

3. lungo l'arco essa si manifesta diversamente a seconda dell'intensità della corrente, presentandosi in due stadi.

Il primo di questi si ha con correnti deboli; la luce è violetta, spettrale ed è costituita da pochissime righe molto sottili e molto brillanti. Il rendimento globale è buono, quasi 2 candele per watt.

Se il tubo è di vetro, poichè coll'aumentare della corrente aumenta rapidamente la temperatura, non è possibile passare al secondo stadio, e solo si può mitigare l'aspetto spettrale di queste luci mediante diffusori fluorescenti, che assorbono parte dell'emissione

Digitized by Google

violetta e ultravioletta, trasformandola in un po' di luce di minore rifrangibilità.

Il secondo stadio si ha quando con l'aumento della corrente questa raggiunga una certa intensità; ne consegue l'aumento dell'eccitazione dei singoli oscillatori luminosi e l'entrata in gioco di altri, lo spettro si arricchisce in tutte le ragioni, la luce diventa bianca e il rendimento cresce fino a 5 candele per watt; se si continua ad aumentare l'intensità della corrente, continua pure a crescere l'energia luminosa irradiata, ma il rendimento va decrescendo.

In questi archi la temperatura è così elevata che al vetro comune è stato necessario sostituire il quarzo fuso o almeno dei vetri ricchi di quarzo, i quali mentre sono più difficilmente fusibili, sono più trasparenti, per i raggi ultravioletti, del vetro comune.

Le misure della temperatura dànno per quest'arco valori inferiori a 1200°, temperatura molto più bassa di quella necessaria per spiegare l'emissione di righe così brillanti, e poichè quando si aumenta la corrente e in conseguenza la temperatura, mentre si producono nuove righe di emissione e aumenta l'intensità delle preesistenti, il massimo dell'energia si sposta verso il rosso, all'opposto di ciò che avverrebbe se l'emissione fosse di temperatura, si deduce che quest'arco deve irradiare per luminescenza e, generalizzando, si è indotti a ritenere che lo stesso avvenga nell'arco fra carboni il cui studio diretto è meno facile.

L'abbondanza dei raggi ultravioletti emessi dalla lampada a vapori di mercurio nel quarzo, l'ha fatta applicare per la sterilizzazione delle acque, in terapia fisica, e in numerose ricerche biologiche.

7. - *Condizioni per l'adescamento dell'arco.*

Supponiamo un comune arco tra carboni, alimentato con corrente continua a un centinaio di volt, e si disponga di un terzo carbone vicino ad uno degli elettrodi e che si possa unire all'uno o all'altro dei poli della sorgente alimentatrice dell'arco.

Si cominci con l'unirlo al polo positivo e si vedrà che se, con una calamita, si devia l'arco verso il nuovo carbone, sarà facile farlo attaccare ad esso, abbandonando l'anodo precedente.

L'esperienza di sostituire l'anodo in azione con un altro freddo, riesce in molti modi, ma invano si tenterebbero le prove, se il terzo carbone fosse unito al negativo e si volesse che l'arco, abbandonando il catodo in azione passasse a questo carbone, *a meno che con opportuni artifizi si scaldasse il terzo carbone fino all'incandescenza.* Solo in tal caso è possibile far sì che l'arco abbandoni il primo catodo per passare al nuovo. Gli artifizi potrebbero consistere nel far scoccare una scintilla elettrica tra il terzo elettrodo e il positivo, e furono minutamente studiati anche dall'Occhialini.

Si può quindi dire che un carbone freddo può diventare anodo di un dato arco voltaico, ma non mai catodo, e s'intende che una volta iniziato l'arco il nuovo anodo diventerà più caldo del catodo.

Lo stesso avviene qualunque siano i metalli tra i quali passa l'arco.

Anche nel modo di adescare l'arco tra due elettrod, tenuti alla tensione necessaria per l'alimentazionei c'è un diverso modo di comportarsi tra il positivo e il negativo.

Per es. se si porta all'incandescenza un carbone che sia in comunicazione col polo negativo e convenientemente vicino al carbone freddo, che sia in comunicazione col polo positivo, l'arco si stabilisce. Ma non si stabilirebbe se le comunicazioni fossero invertite, cioè se si fosse arroventato l'elettrodo positivo.

Ne segue dunque che affinchè un conduttore possa funzionare da catodo di un arco, è necessario che uno dei suoi punti affacciati all'anodo sia portato all'incandescenza, mentre l'anodo può essere freddo; soddisfatta questa condizione, se si eleva sufficientemente la tensione applicata agli elettrodi, l'arco si adesca.

Come casi particolari vediamo che è possibile stabilire l'arco tra un carbone fisso e una grossa massa ruotante di rame, se il carbone è negativo; mai nel caso inverso, perchè la massa di rame ruotante si mantiene fredda, e se portando il carbone in contatto del rame riusciamo anche ad accendere l'arco per un istante, l'immediata sostituzione di una massa di rame fredda al catodo, lo fa spegnere; analogamente è stato possibile stabilire un arco fra una punta metallica e un elettrolita, a patto che la punta funzioni da catodo. (Stark e Cassuto).

8. - *Teoria dell'arco.*

Il Fleming aveva supposto che l'arco consistesse in una corrente di atomi di carbonio, carichi negativamente, partenti dal catodo. Altri, osservando che il carbone positivo si consuma molto più rapidamente di quello negativo, aveva supposto che le particelle di carbone trasportassero la corrente mediante cariche positive dall'anodo al catodo.

Ma il maggior consumo dell'anodo è dovuto esclusivamente alla sua più elevata temperatura, per cui nell'aria brucia più rapidamente del negativo. Esperienze accurate hanno provato che nel vuoto il consumo è enormemente ridotto (1), e che ammettendo nell'arco un fenomeno di natura elettrolitica, l'intensità della corrente non arriverebbe che a 1/50000 della corrente che lo percorre. Mancava però l'esatta conoscenza dei fenomeni fondamentali presenti nell'arco.

Ora i fenomeni essenziali dell'arco elettrico, a quanto abbiamo visto sinora, sono:

1. L'alta temperatura di una piccola regione catodica;

2. La brusca caduta catodica nel potenziale.

Tutti gli altri: alta temperatura dell'anodo, caduta anodica, alta temperatura dell'arco, grandi splendori ecc. sono accessori, talvolta molto importanti per le conseguenze che ne derivano e per le applicazioni che permettono, ma possono anche mancare, e perciò non è su di essi che si possa fondare una teoria dell'arco, bensì questa deve esserne indipendente e nello stesso tempo deve permetterne la spiegazione.

(1) Basta impedire la combustione degli elettrodi, tenendo l'aria in un recipiente chiuso, perchè il consumo si riduca a molto meno di un decimo.

Digitized by Google

Consideriamo un arco a carboni. In causa dell'alta temperatura catodica, si può dire anzitutto che da parte del catodo ci sarà :

1. emissione di elettroni ;

2. grande splendore che provoca l'emissione fotoelettrica di elettroni da parte dei punti, vicini, colpiti dalla luce.

Contemporaneamente l'azione del campo elettrico applicato farà sì che gli elettroni, tosto che si siano liberati dall'elettrodo che li ha emessi, si muoveranno verso l'anodo e, se il campo sarà sufficientemente intenso, ionizzeranno il gas ambiente ; gli ioni negativi generati seguiranno la stessa via, i positivi si precipiteranno sul catodo e con la loro forza viva contribuiranno :

a) a mantenere la temperatura elevata necessaria per l'emissione termoionica ; in questa funzione saranno efficacemente aiutati dal calore Joule che si sviluppa nel piccolo volume dell'elettrodo negativo che sbocca nella regione catodica ;

b) a estrarre coi loro urti violenti nuovi elettroni dal catodo, in aggiunta degli elettroni emessi direttamente.

Esistono quindi tre cause generatrici di elettroni nell'arco :

1. L'emissione termica ;

2. L'emissione fotoelettrica ;

3. Gli urti degli ioni positivi sul catodo.

Fu J. J. Thomson che suppose per il primo che l'arco vero e proprio consistesse in un flusso di elettroni emessi dall'estremità calda del catodo ; e attualmente tutti sono concordi in questo, solo se pure sussiste ancora, resterebbe qualche dubbio su quale delle cause sovraindicate prevalga.

L'effetto fotoelettrico dev'essere però ben piccolo in generale, e tutti sono concordi nell'attribuire ad ad esso una percentuale trascurabile nel numero totale degli elettroni presenti, e in conseguenza una scarsa efficacia nel trasporto della corrente elettrica.

Restano gli altri due effetti.

L'emissione termica di elettroni ha luogo seguendo una ben nota legge, dovuta a Richardson, complicata, nel caso attuale, dal fatto che la presenza di ioni positivi, negativi e di elettroni nello spazio antistante al catodo, deve perturbare l'emissione, che è favorita dai primi, ostacolata dagli altri.

Secondo i calcoli del Bräuer essa sarebbe insufficiente a dar passaggio a più di qualche per cento della corrente dell'arco, e le sue esperienze glielo confermano ; secondo esse, appena cessato il campo fra i due elettrodi, la ionizzazione non è che una piccola frazione di quella necessaria per spiegare la corrente dell'arco. Perciò egli attribuisce un grande effetto alla terza causa, cioè agli urti degli ioni positivi contro il catodo.

Ma il calcolo del Bräuer non è esatto : la legge di Richardson applicata al catodo di carbone, ci conferma che questo dà precisamente origine ad un flusso di elettroni sufficiente per trasportare tutta la corrente dell'arco ; d'altra parte si vede facilmente che l'esperienza del Bräuer fatta subito dopo che sia interrotta la corrente dell'arco, non può dare che una piccola frazione della ionizzazione presente durante il passaggio della corrente.

Per queste ragioni K. T. Compton attribuisce precisamente all'emissione termica la presenza di tutti gli elettroni necessari all'arco.

Secondo questo Fisico, gli ioni positivi e negativi hanno scarsa importanza nel fenomeno della conduzione dell'arco, e servono solo pel trasporto di qualche percento della corrente totale.

Le parti sono quasi invertite e non è improbabile che non sia ancora detta l'ultima parola nella teoria dell'arco.

Si può dire però che tutti siano d'accordo nell'ammettere che la quasi totalità della corrente dell'arco sia trasportata da elettroni, e che in causa delle grandi velocità di questi, il gas ambiente venga ionizzato e perciò siano presenti cariche negative e cariche positive migranti in senso contrario.

Si disponga infatti un terzo elettrodo di fronte alla parte mediana di un arco. È molto facile verificare allora che se esso è positivo rispetto all'arco, una notevole corrente va da esso all'arco, ma se è negativo, la corrente cha va dall'arco ad esso è circa da uno a due o tre per cento della precedente.

Secondo le determinazioni eseguite da Langmuir, nell'arco sono presenti elettroni aventi velocità molto differenti : alcune delle quali possono superare i mille chilometri al minuto sec. In base alla teoria cinetica della materia e alle masse degli elettroni, queste velocità corrisponderebbero alle enormi temperature di 30.000°, 80.000° e persino 200.000°.

Questi elettroni sin da una distanza piccolissima dalla superficie catodica, corrispondente in media al libero percorso degli elettroni nel gas dell'arco (0,3 μ nell'aria alle condizioni normali) urtando contro le molecole di questo generano gli ioni positivi e negativi. Gli ultimi seguitano nella direzione degli elettroni, gli altri in senso contrario ; entrambi, date le masse, enormi rispetto a quelle degli elettroni, hanno velocità molto minori, che possono essere anche meno della centesima parte, sicchè date le opposte direzioni dovremo riscontrare un addensamento di ioni positivi verso il catodo, di negativi verso l'anodo.

Dal catodo si deve passare perciò bruscamente in una atmosfera di cariche positive e, per conseguenza, in un intervallo molto piccolo deve presentarsi la brusca variazione di potenziale detta «caduta catodica».

Nell'attraversare questa, il cui spessore deve essere dell'ordine già detto delle sue escursioni libere, l'elettrone deve acquistare, sotto l'azione del campo, una velocità sufficiente per ionizzare il gas ambiente, vale a dire la caduta catodica deve equivalere al potenziale di ionizzazione del gas stesso, in modo che si possano produrre continuamente nuovi ioni, e il fenomeno possa ripetersi indefinitamente, fino a che rimanga applicata la tensione agli elettrodi.

Gli ioni negativi e gli elettroni devono essere più densi verso l'anodo e quivi produrre un'altra brusca variazione nel potenziale : la « caduta anodica ».

L'anodo a sua volta ricevendo la loro energia cinetica deve essere sede di un grande sviluppo di calore, assumendo una temperatura elevata o no, a seconda della massa interessata nel fenomeno.

Digitized by Google

Se la sua temperatura è elevata, esso emette a sua volta elettroni e questi, dopo un'escursione più o meno profonda nell'ambiente, devono ricadere sull'anodo, da esso succhiati in grazia della sua carica positiva, e nel frattempo dànno origine anch'essi a degli ioni; la loro presenza nell' immediata vicinanza dell'anodo, unita a quella degli elettroni provenienti dal catodo e all'addensamento degli ioni negativi, contribuisce al grande valore della caduta anodica.

La quantità di calore svolta sulla superficie del cratere positivo dev'essere generalmente maggiore di quella svolta dai ioni positivi sul catodo, perchè all'energia di ioni negativi, pari a quella dei positivi, si aggiunge quella degli elettroni, per cui a parità di condizioni, l'estremità positiva, in tutte le specie di archi considerati, è sede di un maggior sviluppo di calore, e perciò, in generale, si scalda più della negativa.

In complesso, l' ipotesi fatta spiega bene tutte le particolarità dell'arco.

9. - *Temperature ed emissioni.*

Le temperature che si hanno in un arco dipendono da varie cause: dal punto che si esplora, dagli elettrodi, dalla pressione e per lo più anche dall'intensità della corrente.

a) *Cratere positivo.* – Nell'arco più studiato; quello tra carboni, si può dire di certo che la temperatura della parte più luminosa, cioè quella del cratere positivo, secondo i risultati più attendibili di numerosissime misure, tra cui cito quelle di Rossetti e di Amerio, è di circa 3900° assoluti, alla pressione ordinaria.

Essa entro larghi limiti, che vanno da pochi ampère sino a 1200, è indipendente dall'intensità della corrente, dalla lunghezza dell'arco, dalla tensione applicata, ed è generalmente considerata come il punto di ebollizione del carbonio.

In compenso l'area del cratere cresce proporzionatamente all'intensità della corrente, secondo la relazione grossolanamente approssimata

$$S = l + 1{,}46\ i$$

dove S indica l'area in mm², l la lunghezza in mm., i la corrente in ampère. Così ad es. con la corrente di 100 amp. per un arco lungo un cm., l'area del cratere viene ad essere di circa 156 mmq.; però essa dipende dalla specie di carboni e dalla loro sezione, per cui in certi casi può anche arrivare a 200 mmq. In parte le differenze possono essere attribuite all'imperfetta definizione del cratere.

Il cratere positivo (Amerio) irradia come un corpo quasi perfettamente nero, sia per l'intensità totale (quasi 1500 Watt per cmq.) sia per la distribuzione dell'energia nel suo spettro, sia infine perchè segue la legge del coseno.

Il suo splendore nelle condizioni comuni è di circa 16 600 candele per cmq. anch'esso indipendente dalla intensità della corrente.

Più elevata ancora pare che diventi la sua temperatura, se si scarica un condensatore di grande capacità nell'arco medesimo, (La Rosa) giungendo sino al rammollimento del carbone, con produzione di grafite e di diamantini, e più ancora con le esperienze di Lummer, producendo l'arco fra carboni, a pressione molto elevata.

Questo fisico, producendo l' arco in ambiente chiuso, a pressioni crescenti fino a 22 atmosfere, ritiene di avere portato il cratere alla temperatura di 6090° ass., ossia press'a poco alla temperatura apparente del sole.

In queste condizioni, la radiazione complessiva è enormemente aumentata e la luce emessa è cresciuta in proporzione anche maggiore; tuttavia, poichè per far passare l'arco tra due elettrodi posti ad una certa distanza, occorre una tensione crescente colla pressione, mentre aumentano le perdite per convezione e per conduzione, non pare che vi sia un vantaggio economico ad usare gli archi sotto forte pressione per produrre la luce.

b) *Punta del catodo o cratere negativo.* – La temperatura della parte più luminosa del carbone negativo, con archi di media potenza aventi la lunghezza di alcuni mm. è di circa 3100° ass., però essa cresce sensibilmente col crescere dell'intensità della corrente e coll'approssimarsi del cratere.

L'area di questa estremità luminosa, che serve da base dell'arco, varia con la corrente; considerandola come circolare, il suo raggio è dato approssimativamente da

$$r = 0{,}43 + 0{,}08\ i$$

dove r è dato in mm. e i in amp., per cui con la corrente di 100 amp. esso diventa mm. 8,43 cui corrisponde l'area di mmq. 56, vale a dire circa ⅓ di quella del corrispondente cratere positivo.

Il suo splendore varia intorno alle 5000 candele, e poichè la sua area è ridotta a ⅓ di quella del cratere positivo, la quantità di luce irradiata è relativamente piccola: circa la decima parte di quella proveniente dal positivo.

c) *Temperatura dell'arco.* – In quanto all'arco non sarebbe forse possibile dire in modo rigoroso, e basandosi sulle sole esperienze fatte coll'arco tra carboni, se la sua emissione, analogamente a quella degli elettrodi, sia di temperatura; certo però la cosa è molto improbabile. Se così fosse la temperatura dovrebbe essere superiore a quella del cratere, perchè certe righe d'emissione dell'arco brillano di più delle corrispondenti radiazioni dello spettro continuo del cratere. Difatti alcune misure fotometriche, fatte da Mathiesen, darebbero una temperatura costante di 4926° in prossimità dell'anodo, decrescente verso la parte centrale dell'arco fino a 2600-3300°, e crescente verso il catodo, dove raggiungerebbe una temperatura, variabile a seconda delle condizioni, intorno a 4000° La temperatura della parte centrale e della parte vicino al catodo dipendono dalla lunghezza dell'arco.

Se però si tien conto di ciò che abbiamo visto

Digitized by Google

nell'arco a vapori di mercurio, deduciamo che anche per questo l'emissione è dovuta più che alla temperatura, alle speciali eccitazioni prodotte dai vari fenomeni che vi avvengono.

La temperatura aumenta certo sensibilmente quando si fa scaricare un condensatore nell'arco, data la grande rapidità con cui avviene la trasformazione di energia che vi ha luogo. In tali circostanze si osserva che al crescere dell'intensità della scarica elettrica, lo spettro di emissione subisce interessanti mutamenti, i quali corrispondono ad aumenti di temperatura e lo avvicinano allo spettro delle scintille, dimostrando l'esistenza di un legame tra la temperatura dell'arco e la sua emissione.

Lo splendore per contro, essendo limitato a poche radiazioni è, in complesso, molto piccolo rispetto ai precedenti: forse da 100 a 200 candele, secondo lo spessore; perciò, data anche la non grande superficie, l'arco contribuisce ben poco alla luce, che si può dire dovuta nella quasi totalità al cratere positivo.

d) *Luce irradiata.* - L'arco voltaico non irradia uniformemente in tutte le direzioni. Se esso è coi carboni verticali e il positivo in alto, ha una emissione nulla nella direzione dell'asse, dall'alto verso il basso, crescente in direzione sempre più discosta dalla verticale, fino a un massimo verso i 45°, e decrescente poi ancora fino a zero nella direzione della verticale verso l'alto.

Questa distribuzione, che in un arco centrato è costante in tutti i piani verticali passanti per l'asse, varia col tipo dell'arco e viene temperata mediante riflettori e diffusori, i quali proteggono contemporaneamente la vista dall'eccessivo splendore. Con corrente alternata essa presenta due valori nulli in senso verticale, un minimo orizzontalmente e due massimi verso 45° e 135°.

Nel complesso la luce irradiata da tutto l'insieme dell'arco voltaico, sotto una tensione di 50 volt, con corrente continua di i ampère è data, con una certa approssimazione, in candele decimali nella direzione in cui l'intensità è massima, da

$$I_m = 200\ i + 4\ i^2.$$

L'intensità media sferica I è circa la terza parte dell'intensità massima, cioè:

$$I = \tfrac{1}{3}\ I_m$$

e l'intensità media emisferica, calcolata nell'emisfera irradiata dal positivo è quasi doppia dell'intensità media sferica.

Il flusso luminoso totale è

$$\Phi = 4\ \pi\ I = 4{,}2\ I_m \text{ lumen.}$$

Così com'è, l'arco voltaico tra elettrodi di carbone, considerato come sorgente di luce, e paragonato alle sorgenti in uso fino a una ventina di anni fa, ha un discreto rendimento. Questo varia alquanto a seconda dei tipi, però, globalmente considerato, si aggira sempre intorno a un po' più di una candela per ogni watt di energia assorbita se si considera l'intensità media emisferica; e a qualcosa meno di una candela per watt se si considera l'intensità media sferica.

Le sue parti contribuiscono molto diversamente all'emissione totale della luce e vi intervengono con rendimenti molto differenti.

Il rendimento è massimo pel cratere dove si ottiene l'emissione di circa 6 candele per ogni watt di energia irradiata, e di 4 candele per ogni watt dell'energia elettrica assorbita nel brevissimo intervallo che corrisponde alla caduta anodica di tensione; la radiazione luminosa del cratere è quasi un terzo della radiazione totale che esso emette.

La sua ricchezza in raggi ultravioletti è stata largamente utilizzata in terapia per le malattie della pelle, utilizzandolo nella forma ideata dal Finsen.

Come abbiamo detto, la punta del negativo irradia molto meno del cratere positivo, circa un terzo a parità di superficie, e quindi nel complesso la decima parte; anche il rendimento è minore, pari circa a due candele per ogni watt di energia assorbita.

L'arco infine è la parte che irradia meno di tutte; e poichè assorbe una porzione sensibile dell'energia elettrica, esso fa abbassare notevolmente il rendimento dell'insieme.

10. - *Lampade ad arco.*

I rendimenti sopradetti spettano alle superfici irradianti, considerate isolatamente e sono naturalmente superiori ai reali, in quanto che, nella pratica, la presenza degli elettrodi affacciati determina degli assorbimenti reciproci della luce emessa, con abbassamento generale dei rendimenti.

Tuttavia, rispetto alle sorgenti in uso allorchè fu studiata l'applicazione dell'arco all'illuminazione, esso rappresentava tale progresso sia nello splendore, sia nell'intensità luminosa, nella vivacità dei colori, e nei rendimenti, che fu considerata come la lampada destinata a un grande avvenire.

Mai altra sorgente fu più studiata, e ben a ragione si può dire che, dalla introduzione delle vecchie candele di Jablakoff, essa sia stata la luce delle grandi feste, delle grandi occasioni, la luce ideale, perchè la più adatta a sostituire il giorno.

I numerosi studi furono indirizzati in due sensi:

1) a rendere regolare il funzionamento di tali lampade;

2) ad aumentarne i rendimenti.

Nel complesso, se si tien conto dell'energia perduta lungo i conduttori e di quella assorbita da quell'accessorio indispensabile per il pratico funzionamento, che è il regolatore automatico dell'arco, si comprende che il rendimento dell'insieme possa scendere a meno di due candele per watt, allorchè l'arco sia alimentato da corrente continua, a anche solo a circa una candela allorchè l'alimentazione sia fatta con corrente alternata.

Si è cercato in vari modi di aumentare questi rendimenti e vi si è riuscito aumentando sopratutto, come vedremo, quello della parte che è di gran lunga la più deficiente, cioè dell'arco propriamente detto.

Digitized by Google

11. - *Regolatori.*

Il funzionamento fu a poco a poco reso quasi perfetto coll'adozione di carboni ben studiati, col positivo animato, ossia colla parte assiale meno compatta, e coi *regolatori.*

Scartata presto l'idea di servirsi di dispositivi puramente meccanici, furono adottati i regolatori automatici elettromagnetici. Questi consistono in elettrocalamite che funzionano in modo da mantenere i carboni a una data distanza, ciò che può avvenire in più modi.

I carboni siano parte di un movimento di orologeria, e questo sia comandato da uno scappamento unito all'ancora dell'elettrocalamita, in modo che quando questa agisce, lo scappamento imprigioni una ruota dentata. Se l'elettrocalamita è in serie coll'arco, (*regolatori in serie*) allorchè i carboni sono in contatto, la sua magnetizzazione è intensa ed agendo sull'ancora stacca i carboni, per cui l'arco si accende e fissa la ruota dello scappamento; a poco a poco, col funzionamento, i carboni si consumano, l'arco si allunga, la corrente diminuisce e l'ancora meno energicamente attirata libera la ruota; questa col suo moto riporta più vicini i carboni, la corrente aumenta e l'elettrocalamita agendo più energicamente sull'ancora, ferma la ruota e in conseguenza i carboni.

Un funzionamento analogo si ha se l'elettrocalamita è in derivazione sull'arco (*regolatori in derivazione*).

Quasi perfetto si può dire il funzionamento dei *regolatori composti*, nei quali v'è un circuito in serie e uno in derivazione sull'arco, e ancora migliore è la regolazione quando l'arco è alimentato da corrente alternata.

12. - *Archi a fiamma.*

Si riuscì ad aumentare molto il rendimento impregnando l'anima del carbone positivo mediante sali volatili di cerio, di calcio, di sodio ecc.; si ottennero i così detti carboni ad effetto (bianco, rosso, giallo ecc.). Il negativo per lo più viene conservato compatto e di carbone puro. Con questi elettrodi, a parità di tensione, si hanno archi più lunghi che coi carboni comuni, e poichè questi archi contengono i vapori dei detti metalli a temperatura elevatissima, e quindi a un alto grado di eccitazione, l'arco diventa molto più splendente, aumentando fortemente la luce totale e in conseguenza il rendimento globale che può giungere a 4 candele per watt.

L'introduzione di corpi nell'arco, allo stato di vapori ottenuta impregnando i carboni di sali o di ossidi, ha permesso di estendere molto le nostre conoscenze sugli spettri di emissione che, nelle speciali condizioni in cui i corpi vengono a trovarsi dentro all'arco, sia per temperatura che per eccitazione, sono particolarmente ricchi di righe e brillanti.

13. - *Archi forzati.*

Un ulteriore aumento si ebbe nei così detti archi Beck o anche archi forzati, nei quali si usa un carbone a effetto per elettrodo positivo, un carbone più sottile compatto e puro per il negativo e si alimentano con correnti di densità circa quintupla della densità ordinariamente usata. Così ad es. se l'anodo ha 16 o 17 mm. di diametro e il negativo 11, mentre tra essi, negli archi ordinari, si farebbe passare una corrente di una ventina di ampère, in questi se ne mandano 100.

L'aspetto dell'arco viene molto modificato: un getto di vapori luminosissimo parte dal cratere, che si scava notevolmente, una fiamma violenta parte dal negativo e investe l'estremità del positivo, sfuggendo poi da questo con un lungo pennacchio (fig. 6).

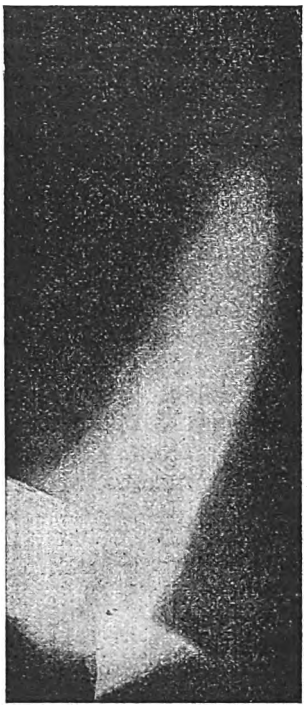


Fig. 6.

I vapori metallici contenuti nel getto positivo acquistano in quest'arco una eccitazione superiore a quello dell'arco precedente e quindi uno splendore che è più che triplo di quello del cratere positivo ordinario. La luce irradiata è molto più intensa, però non nella stessa proporzione, perchè il cratere in questi archi è sensibilmente ridotto. Gehlhoff, sostituendo ossidi metallici ai fluoruri, e aumentando ancora la densità della corrente, elevò lo splendore a oltre sette volte quello del cratere positivo dei comuni carboni, e più ancora ottennero Gerdien e Lotz, costringendo un arco forzato a passare in uno stretto diaframma.

L'effetto Joule lungo i carboni, date le grandi densità delle correnti impiegate, è cresciuto in tale misura, che essi bruciano molto rapidamente per tutta la lunghezza percorsa dalla corrente e dopo pochi minuti il negativo si inflette e si rompe.

Per il funzionamento prolungato bisogna proteggere i carboni da questa combustione, e ciò è stato fatto con vari metodi: o ricoprendoli elettrolitica-

Digitized by Google

mente con una foglia sottile (0,1 mm.) di rame, che mentre contribuisce fortemente alla conduzione, impedisce l'ossidazione del carbone, o avvolgendo i carboni con una fiamma riducente, o con un gas inerte, o facendo portare la corrente da robusti elettrodi di rame fino a pochi millimetri dall'arco. È con tali archi che si fanno i proiettori di grande potenza, nei quali spesso, per ottenere la necessaria regolarità di funzionamento si fa ruotare lentamente il positivo, il cui cratere risulta così perfettamente normale all'asse del carbone.

14. - *Arco a magnetite.*

Di notevole rendimento è l'arco detto a *magnetite*, in cui, all'opposto di ciò che avviene tra elettrodi di carbone, la parte luminosa è l'arco propriamente detto.

Il positivo è un blocco cilindrico di rame, che si conserva relativamente freddo; il negativo è un cilindro fatto con un impasto di magnetite e di cromite avvolto in una sottile foglia di ferro. L'alimentazione è fatta con una sessantina di volt e la corrente conveniente è di circa 7 ampère.

Da un punto luminoso e variabile dell'estremità del negativo, parte una fiammella luminosissima che va a lambire l'anodo.

La luce è perfettamente bianca, ma lo spettro non è continuo, bensì costituito da numerosissime righe, quasi tutte del ferro, che sono distribuite in tutto lo spettro con molta uniformità.

15. - *Arco fra elettrodi di Tungsteno (puntolite).*

Se in un palloncino di vetro è fatto il vuoto e in esso si trova una spiralina di tungsteno funzionante da catodo, in vicinanza di una pallina dello stesso metallo, funzionante da anodo, facendo passare una corrente elettrica nella spiralina si porta questa all'incandescenza e all'emissione di elettroni.

Se ora applichiamo al sistema la f.e.m. necessaria l'arco viene adescato e si mantiene anche interrompendo la corrente dalla spiralina.

I due elettrodi sono luminosissimi, la pallina può raggiungere uno splendore che è circa $\frac{1}{3}$ di quello del cratere positivo di un comune arco a carboni. L'insieme può funzionare anche con corrente alternata e in qualche tipo, la spiralina funziona solo nell'istante iniziale per adescare l'arco fra due palline di tungsteno, dopo di che viene tolta dal circuito alimentatore dell'arco, e s'interrompe anche la corrente che la riscalda.

16. - *Archi tra metalli.*

Gli studi che furono fatti sopra gli archi elettrici fra elettrodi metallici, non hanno in fondo svelato nulla di sostanzialmente diverso da quello che si ottiene con l'arco a carboni e con l'arco a mercurio.

Come si è già detto, la formula della Ayrton, opportunamente modificata, vale per essi, non solo ma se non si introduce una cura speciale, o se non esiste una causa in contrario, in tutti gli archi fra metalli eguali, si verifica che la temperatura dell'anodo supera sempre la temperatura del catodo.

Però non tutti i metalli si comportano egualmente e alcuni di essi si prestano molto male per ottenere gli archi.

Ad es. un arco tra elettrodi di argento richiederà condizioni speciali, p. es. elettrodi sottili, altrimenti il loro raffreddamento lo spegnerà facilmente; un arco tra elettrodi di rame o di ferro deve lottare contro l'ossidazione, e questa si manifesta ancora più efficace tra elettrodi di zinco o di ottone, tanto da opporre, al passaggio della corrente, uno strato capace di far spegnere l'arco.

Questa proprietà è applicata nei parafulmini delle centrali elettriche, per proteggerli dai fulmini e dagli archi che ne conseguono, costringendo la scarica a frazionarsi in tanti archi disposti in serie, i cui elettrodi sono fatti con i cosidetti metalli *anti arco.*

17. - *Archi asimmetrici e raddrizzamento delle correnti alternate.*

Un arco può essere alimentato da corrente alternata, purchè la frequenza sia tale che durante la cessazione della corrente che si accompagna con l'annullamento della differenza di potenziale fra i due elettrodi, il raffreddamento sia così piccolo che l'elettrodo funzionante da nuovo catodo emetta ancora un numero di elettroni sufficienti per l'adescamento dell'arco. Questo perciò consiste in una serie di accensioni e di spegnimenti di frequenza doppia di quella della corrente alimentatrice.

Basta una piccola differenza fra i due elettrodi perchè uno di essi si conservi più freddo dell'altro; allora da esso passerà verso il più caldo un minor flusso di elettroni che nel senso inverso, e in conseguenza la corrente non verrà soltanto deformata, come in generale, ma la componente che va dall'elettrodo freddo al caldo sarà superiore all'altra, o ciò che fa lo stesso, nel circuito che alimenta l'arco, si avrà la sovrapposizione di una corrente continua che va dall'elettrodo più freddo al più caldo, alla corrente alternata.

Se poi si mantiene freddo uno degli elettrodi, la corrente potrà passare solo se diretta dall'elettrodo freddo al caldo e non inversamente, perciò della corrente alternata passerà solo una delle componenti, e si comprende che, con più archi, si possano utilizzare entrambe le alternanze della corrente monofase, e tutte quelle della corrente trifase.

I migliori raddrizzatori di questo tipo sono stati ottenuti con archi a vapore di mercurio. In essi il catodo è dato dal mercurio e l'anodo dal ferro o da altro metallo; i rendimenti di questi raddrizzatori sono buoni, dal 70 % possono giungere sino al 90 %, ma non sempre essi sono tali da permettere in generale l'abbandono dei raddrizzatori elettromagnetici o fondati su altri principi.

18. - *Proiettori.*

L'arco ha perduto in questi ultimi anni gran parte della sua importanza come mezzo d'illu-

Digitized by Google

minazione, ma ne ha acquistata in alcuni casi particolari. Un moderno proiettore potente, possiede un arco forzato da 100-150-250 e più ampère, col carbone positivo disteso lungo l'asse, rotante, e col cratere disposto nel fuoco di uno specchio parabolico, ad esso rivolto ; col negativo alquanto inclinato, per non intercettare la luce diretta allo specchio.

Questi proiettori, per via del grande splendore, hanno portate notelvomente superiori a quelli che si costruiscono con archi comuni; però la diminuita sezione del cratere produce un fascio di divergenza poco superiore a due gradi, illuminando quindi a parità di distanza una zona sensibilmente inferiore a quelle che è illuminata con archi comuni.

Poichè in questi archi forzati si usano carboni ad effetto, che producono fumo intenso, una energica aspirazione lo deve asportare, mentre contribuisce al raffreddamento dello specchio.

Con proiettori di questa specie si giunge a scoprire movimenti di gruppi di persone a 15 Km. di distanza, se l'aria è molto limpida.

19. - *Arco cantante.*

Simon nel 1898 aveva trovato che se il circuito di un arco è concatenato magneticamente con quello di un microfono, e a questo si fa giungere un suono, l'arco lo ripete.

Poco dopo il Duddell (1900) trovò che se un arco fa parte di un circuito oscillante, costituito da una autoinduzione e da una capacità in serie, emette spontaneamente suoni di altezza e intensità costanti, la cui frequenza è legata ai valori dell'autoinduzione e della capacità.

L'origine di questi suoni sta nelle rapide pulsazioni di volume che le variazioni periodiche della corrente originano nell'arco. La forma e l'intensità di queste oscillazioni dipendono da varie circostanze e sono state minuziosamente studiate col metodo dell'oscillografo.

Questo arco, nella forma datagli da Poulsen, ebbe per parecchi anni una notevole importanza per la produzione di oscillazioni persistenti, che costituirono un grande progresso nella radiotelegrafia e nella radiotelefonia. Esso avviene tra un catodo di carbone e un anodo a disco di rame rotante, in atmosfera di idrogeno, con soffio elettromagnetico, per cui si richiedono differenze di potenziali molto maggiori che negli archi comuni, ciò cha consente di mettere in gioco grandi potenze.

FORNO ELETTRICO

20. - L'energia elettrica ha messo a disposizione degli scienziati e dei tecnici, i modi più vari, più comodi, più semplici e più efficaci per produrre l'energia termica, anche nelle condizioni più complesse, quando invano si potrebbe cercare di produrla e di utilizzarla altrimenti.

A seconda del modo col quale si utilizza l'energia elettrica si hanno vari tipi di forni.

I principali sono :

1) Forni a resistenza ;
2) Forni a induzione ;
3) Forni ad arco ;
4) Forni a scariche elettriche.

In alcuni sono fusi due tipi diversi.

21. - *Forni a resistenza.*

Ve ne sono di due specie, che si possono dire a *resistenza esterna*, se il calore è prodotto per effetto Joule in un conduttore disposto intorno ad una muffola o ad un tubo di porcellana, cemento, quarzo, alundum, ecc. in cui sia posto il corpo da trattare ; il conduttore può anche assere affogato nel materiale refrattario. Si dicono a *resistenza interna* se il calore è sviluppato dalla corrente elettrica che attraversa direttamente il materiale che deve essere trattato.

Nei primi, per lo più, il conduttore è fatto con filo difficilmente fusibile (nicromal, platino, platino iridiato ecc.) in questi casi si possono ottenere temperature elevate alquanto al di sopra di 1000°. Se per contro si ricorre a fili di rame, si ottiene un riscaldamento minore, che però può essere distribuito più uniformemente. Con resistenze di carboni o di fili di molibdeno debitamente protetti contro l'ossidazione, oppure con ossidi conduttori a caldo, si possono ottenere temperature molto più elevate.

Mediante termoregolatori è facile ottenere un ambiente in cui la temperatura si mantenga lungamente costante e molto uniformemente distribuita, ed è anche facile operare producendo il vuoto, oppure forti pressioni nell'interno del forno.

Per questa ragione questo tipo di forno è utile per la determinazione dei punti di trasformazione delle sostanze: fusione, ebullizione, dissociazione; per la fabbricazione di leghe non difficilmente fusibili, per la preparazione di corpi semplici, per lo studio dell'emissione per temperature non molto elevate.

I forni a resistenza interna, data la irregolarità della distribuzione del materiale e la loro eterogeneità, specialmente nei primi momenti del funzionamento, si prestano meno bene per questi scopi, ma sono molto adatti per manipolazioni in cui occorrono temperature elevate, come ad es. quando si tratti di ripristinare il ferro dai rottami.

Talvolta il forno è costituito da un semplice tubo cilindrico di carbone, o di grafite, percorso dalla corrente elettrica ed allora esso si presta molto bene per lo studio dell'emissione anche a temperatura elevatissima, costituendo l'interno del tubo un corpo perfettamente nero. È con un forno di questa specie che fu possibile a Lummer e Pringsheim di decidere fra le leggi di Wien e di Plank, riguardanti la distribuzione dell'energia nello spettro del corpo nero.

Si comprende che con questi forni a resistenza interna si possano raggiungere temperature molto più elevate che con gli altri, inquantochè il calore viene sviluppato nel materiale stesso anche se questo sia già passato allo stato liquido.

Digitized by Google

In compenso è meno facile con essi anzichè coi precedenti, operare nel vuoto, o sotto pressioni ottenute mediante aria o altro gas, per la difficoltà di dar passaggio agli elettrodi.

L'energia elettrica può essere fornita in vari modi, e poichè le dimensioni di questi forni possono essere molto varie, essi possono rendere utili servizi tanto nelle minute ricerche dei laboratori, quanto nella tecnica.

22. - *Forni a induzioni.*

La corrente elettrica destinata a produrre il calore per effetto Joule, anzichè condotta al circuito del forno o al materiale stesso, può esservi indotta.

Ben inteso che, nel secondo caso, una parte del materiale da trattare o un altro conduttore ausiliario devono, fin dal principio, costituire un circuito chiuso, altrimenti la corrente indotta non potrebbe stabilirsi e il forno rimarrebbe freddo.

Forni di questa specie devono possedere due circuiti: un primario e un secondario. Il primo alimentato dalla corrente alternata stradale o da altra appositamente generata, e il secondario ben concatenato magneticamente con esso. Quando il secondario è costituito da una massa conduttrice liquefatta, le azioni elettrodinamiche vi producono una violenta agitazione spesso convenientissima, permettendo la più intima mescolanza delle varie parti, e la possibilità di ottenere prodotti perfettamente omogenei.

Col forno a induzione si possono ottenere temperature superiori a quelle dei forni a resistenza esterna, col vantaggio sopra quelli a resistenza interna, di poter operare sui materiali senza la presenza di carboni o di altri elettrodi, i quali potrebbero introdurre delle impurità, e di poter per ciò ottenere prodotti puri e perfettamente definiti.

Essi sono di due tipi: a bassa frequenza quando usano frequenze di 50, 25, 16 periodi e anche meno, oppure ad alta frequenza. In questi ultimi è inutile il ferro per concatenare i circuiti, ed è facile ottenere correnti indotte sufficientemente intense, anche se il secondario non sia perfettamente chiuso, come avviene quando si ha da trattare del materiale in pezzi che debbano essere fusi.

La frequenza è determinata dalle condizioni di un circuito oscillante a scintilla o di altra specie. I rendimenti sono molto superiori ai forni del primo tipo e possono arrivare al 30 %.

Altro notevole vantaggio del forno a induzione è che con esso è facile operare sia sotto pressione, sia nel vuoto. Per queste ragioni questi forni sono molto utili tutte le volte che occorra produrre corpi di costituzione rigorosamente determinata, come ad es. leghe speciali, acciai senza carbone: ferro-nichel, ferro-cobalto, ecc.

23. - *Forni ad arco.*

La temperatura massima che si sa ottenere e utilizzare comunemente è quella del cratere positivo di un arco a carbone. Essa ammonta a 3900° e in un volume molto piccolo, qual'è quello occupato dall'arco ha luogo una poderosa trasformazione di energia elettrica.

Con un arco lungo 1 cm., alimentato da 100 amp. a 60 volt, il cratere ha meno di 2 cm.^{2} di area e il volume occupato dall'arco è poco superiore a 1 cm.^{3}; la potenza che vi viene trasformata in calore è di 6.000 watt, pari a oltre 1400 p. calorie per ogni minuto secondo.

S'intende quindi come la temperatura di un piccolo ambiente intorno all'arco, ben protetto dal raffreddamento, possa raggiungere in breve tempo valori elevatissimi.

Si osservi ancora che intorno a un arco sono, in breve spazio, presenti tutte le temperature, da quella dell'ambiente a quella massima, e si comprenderà facilmente come esso possa prestarsi per favorire una infinità di reazioni chimiche.

Ad es., nell'aria umida, un arco a carbone origina anidride carbonica, ossido di carbonio, metano, etilene, acetilene, cianogeno, acido cianidrico, ossidi di azoto. Per conseguenza era legittima l'attesa che, producendo l'arco in ambienti determinati, si potessero ottenere condizioni opportune per la formazione di molti composti chimici.

Il primo che abbia dimostrato l'enorme utilità dei forni ad arco fu il Moissan che riuscì con esso a fondere e volatizzare quasi tutti corpi e a fabbricare dei diamantini e della grafite.

Egli creò i veri forni ad arco, le cui dimensioni vanno dai pochi cm.^{3} necessari per le sue esperienze, ai parecchi m.^{3} di alcuni tipi destinati alla grande industria chimica o all'industria metallurgica.

Nei forni industriali poderosi elettrodi di grafite aventi vari dm.^{2} di sezione, passano tra le grosse pareti refrattarie del forno e fra essi viene mantenuto un arco elettrico, mediante una corrente di parecchie migliaia di ampère, con una tensione di una sessantina di volt.

I tipi sono numerosissimi.

In alcuni l'arco passa fra i due elettrodi e questi sono al di sopra del materiale da scaldare: in altri passa tra gli elettrodi e il crogiolo; in altri ancora il materiale stesso da trattare costituisce uno degli elettrodi; taluni sono a riverbero, cioè utilizzano il calore irradiato dalla parete superiore che si scalda enormemente.

Alcuni di essi potrebbero costituire un tipo a parte, misto, nei quali il calore è svolto da uno o più archi e per effetto Joule.

In questi, una soletta conduttrice costituisce uno degli elettrodi; su di essa sono disposti strati di materiale refrattario e semiconduttore a forma di largo crogiuolo, al di sopra il materiale da trattare e al di sopra di questo, uno o più elettrodi di carbone. L'arco avviene tra questo e il materiale, mentre nel crogiuolo si sviluppa il calore per il passaggio della corrente.

Il forno è talora fisso e richiede un agitatore, tal'altra oscillante (Stassano), e tal'altra ancora rotativo per produrre un buon rimescolamento dei materiali.

Per scopi speciali si hanno altri tipi ancora.

Digitized by Google

Per la fabbricazione dell'acido nitrico, utilizzando la reazione che l'arco produce tra l'azoto e l'ossigeno dell'aria, serve il forno Birkeland-Eyde, in cui l'arco prodotto mediante una corrente alternata è espanso da un campo magnetico avente la direzione del suo asse, in modo da formare un disco di 3 m. di diam., nel quale si fa passare l'aria; oppure il forno Schönherr, in cui un arco lungo alcuni metri è prodotto in un tubo nel quale si fa passare l'aria, e costituisce una lunga colonna luminosa dotata di lento moto elicoidale.

Le applicazioni dei forni ad arco sono numerosissime nella metallurgia, ove serve per il trattamento di ogni specie di minerali, per la produzione del ferro e di altri metalli, per la produzione del carborundum e di altri carburi metallici, dei siliciuri, dei boruri ecc. per la preparazione dei rubini e degli zaffiri artificiali; in chimica per lo studio dei corpi semplici a elevato punto di trasformazione, per la fusione e l'ebullizione degli stessi, come ad es. boro, silicio, tungsteno ecc. e per lo studio delle reazioni che avvengono a elevate temperature.

24. - *Forni a scarica elettrica.*

Questo tipo non è ancora entrato nella grande industria, ma è lecito supporre che vi possa dare risultati importanti, allorchè sotto la spinta dei bisogni industriali sia stato opportunamente trasformato, se si pensa alla sua utilità nelle ricerche scientifiche e alla possibilità ch'esso fornisce di raggiungere le più elevate temperature.

Se sul cammino di un fascio catodico si dispone un corpo atto ad assorbirlo, l'energia del fascio si trasforma in gran parte in calore. Come si è visto a proposito degli archi, in questi sono presenti elettroni le cui velocità corrispondono alle temperature enormi di 100.000 e più gradi, raggiungendo il valore di 1000 e più Km.

Ora nelle scariche nei gas rarefatti, prodotte da enormi differenze di potenziale, si possono avere delle velocità molto maggiori, corrispondenti a temperature fantastiche di milioni di gradi. Per conseguenza se con gli archi si raggiungono temperature già così elevate, è legittima la speranza che con le scariche nel vuoto si possano raggiungere temperature ancora superiori, la cui limitazione sarà data sopratutto dalle perdite di calore del corpo colpito dal fascio di elettroni e dalla sua volatilizzazione.

La costruzione degli apparecchi destinati a raggiungere elevate temperature con questo mezzo, ricorda per ora molto da vicino quella dei tubi a vuoto, aventi per scopo la produzione dei raggi X, e in essi è stato possibile ottenere la fusione del boro, del tantalio e di altri corpi poco fusibili.

In alcuni di questi forni viene utilizzata la grande quantità di energia che si trova nel piccolo spazio dove si manifesta la caduta anodica di potenziale; questa viene esagerata in un tubo a vuoto in cui il catodo è di platino rivestito di un ossido alcalino terroso; la caduta viene concentrata vicinissimo all'anodo stesso dove può essere utilizzata trasformando l'energia in calore. Si è così ottenuta la fusione del tungsteno.

È noto dallo studio della scintilla elettrica che in essa si ha una temperatura notevolmente superiore a quella dell'arco. È possibile quindi che seguendo la via ora indicata, si possano ottenere, anche in volumi molto maggiori di quelli occupati dalla scintilla, temperature notevolmente più elevate di quelle che si hanno nei forni ad arco.

Dalla breve esposizione fatta risulta chiaro che il forno elettrico è uno strumento poderoso ed elastico che si presta a tutti gli scopi, sia nella forma, sia nelle dimensioni, tutte le volte che occorra trasformare dell'energia elettrica in calore, ed è per ciò destinato a rendere ancora numerosissimi servizi, tanto alla scienza quanto all'industria.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. ING. UGO BORDONI

R. SCUOLA D'INGEGNERIA DI ROMA

L'ILLUMINAZIONE ELETTRICA

Digitized by Google

Digitized by Google

I. - Il problema della produzione artificiale della luce.

1. - *Generalità.*

L'impiego dell'energia elettrica fornisce oggi la più importante delle soluzioni del problema della produzione artificiale della luce.

Lo studio dei fenomeni costituenti il fondamento dei principali sistemi di illuminazione elettrica ebbe inizio subito dopo la immortale invenzione di Alessandro Volta; risalgono difatti al 1801 le prime ricerche sistematiche di cui si abbia notizia (Thenard e Hachette) intorno alla incandescenza dei conduttori percorsi dalla corrente elettrica ed al 1808 le prime esperienze di Davy sull'arco voltaico fra elettrodi di carbone. Dovettero tuttavia trascorrere alcuni decennî prima che si pensasse ad utilizzare questi fenomeni per la produzione artificiale della luce e, poi, alcuni altri decennî prima che la illuminazione elettrica cominciasse a progredire e diffondersi sino a raggiungere rapidamente la grandissima importanza attuale. Ma per lumeggiarne a sufficienza lo sviluppo progressivo, in relazione anche alle trasformazioni subite da altri sistemi di illuminazione, individuarne lo stato presente ed esaminare la possibilità di ulteriori progressi, è indispensabile, anzitutto, riassumere i termini generali del problema della produzione artificiale della luce.

Allorchè la lunghezza d'onda λ dell'energia raggiante è compresa tra certi limiti, questa forma d' energia ha notoriamente la proprietà di impressionare la retina dell'occhio umano, di dare origine, cioè, alla sensazione della luce. Questa proprietà, posseduta al massimo grado dalle radiazioni $\lambda = 5560$ *U.A.*, può essere quantitativamente individuata dalla considerazione di un adatto *coefficiente di visibilità* v, variabile con λ, assumendo come unità il suo valore massimo. Data la continuità del variare di v con λ, i limiti λ_1 e λ_2 dello spettro visibile non sono suscettibili di determinazione precisa; a scopo di orientamento può tuttavia dirsi che essi sono prossimi, rispettivamente, a 4000 e 7000 *U.A.*

Realizzare una sorgente artificiale di luce, significa perciò costruire un sistema di corpi il quale emetta dell'energia raggiante *visibile*. Per costringere il sistema a questa emissione, è naturalmente indispensabile fornirgli dell'energia sotto una forma adatta; in un certo senso, *una lampada è dunque un vero trasformatore di energia.* È in base alla natura dell'energia fornita (*energia primaria*) che può farsi una prima grande classificazione delle sorgenti di luce. Le lampade che l'umanità ha adoperato sino alla seconda metà del secolo scorso appartengono senza eccezione alla categoria delle *lampade a fiamma*, nelle quali l'energia occorrente viene fornita dalla ossidazione di corpi adatti (*C*, *H*); ma sono bastati pochi decennî perchè il primo posto fosse preso dalle lampade alle quali l'energia viene somministrata sotto forma elettrica.

La constatazione che l'occhio umano è abituato da tempo immemorabile alla luce diurna, fa altresì comprendere quanto sia desiderabile che la luce artificiale si scosti poco dal colore medio della luce diurna (*luce bianca*); numerose ricerche hanno chiarito che questo colore medio è sensibilmente quello della luce emessa dal *corpo nero* alla temperatura di 5200° K.

Le difficoltà che si incontrano nella produzione artificiale della luce hanno in buona parte origine dalla *necessità di ridurne il costo complessivo al minimo.* Questo costo è formato:

a) *dal costo dell'energia* (*o delle sostanze*) *consumata.* Occorrerà perciò ridurre al minimo, a parità di risultati da ottenere, l'energia di cui la lampada ha bisogno, oppure il peso delle sostanze che forniscono questa energia e che si consumano; e dare altresì la preferenza, nei limiti del possibile, alle forme d'energia ed alle sostanze meno costose.

b) *dall'insieme delle spese accessorie*, richieste dall'eventuale periodico ricambio della lampada o di alcune sue parti, da opere di manutenzione eventualmente occorrenti, e così via.

Per individuare uno degli elementi che hanno maggiore influenza sul costo della luce, e cioè il grado di perfezione raggiunto da un qualsiasi tipo di lampada, considerata come un trasformatore di energia, si è messo sovente in evidenza il rapporto fra l'energia raggiante visibile ($\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon . d\lambda$, detta ε la emissione specifica) e tutta l'energia raggiante contemporaneamente emessa ($\int_0^{\infty} \varepsilon . d\lambda$); oppure, l'analogo rapporto fra l'energia raggiante visibile e tutta l'energia contemporaneamente somministrata alla lampada

Digitized by Google

questo secondo rapporto è minore dell'altro, chè non tutta l'energia fornita viene trasformata in energia raggiante. Ma questi due rapporti, pur avendo entrambi carattere di rendimento ed un significato interessante, non sono completamente adatti per due ragioni: la prima, fondamentale, è che la quantità di luce che una lampada fornisce dipende non solo dalla quantità d'energia raggiante visibile emessa, ma anche, e larghissimamente, dalla proporzione delle singole radiazioni; la seconda ragione, non trascurabile, è la indeterminazione dei limiti dello spettro visibile, limiti la cui posizione (necessariamente convenzionale) ha forte influenza sopra i valori numerici dei rapporti. Più significativa è certo la grandezza η che si ottiene sostituendo, nei due rapporti precedenti, l'energia raggiante visibile $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \varepsilon . d\lambda$ col termine $\int_0^{\infty} \varepsilon\, v . d\lambda$, cioè, con la quantità fisiologicamente equivalente di energia monocromatica di visibilità massima; ma se così cadono entrambe le precedenti ragioni, sorge l'inconveniente che verrebbe ad essere considerata come perfetta soltanto quella lampada che trasformasse tutta l'energia ricevuta in radiazioni $\lambda = 5560$ *U.A.*; che fornisse, cioè, una luce di colore generalmente inaccettabile (giallo-verde). Bisogna dunque per lo meno completare la considerazione della grandezza η tenendo presente qual'è il valore η_b che competerebbe ad una sorgente di luce che emettesse soltanto il complesso di radiazioni visibili che occorrono per formare della *luce bianca*. Ora, per una sorgente di luce che emetta come il corpo nero a 5200° K, ma soltanto fra 4000 e 7000 *U.A.*, si ha (sostituendo ovviamente gli integrali con sommatorie):

$$\eta_b = \frac{\int_{4000}^{7000} \varepsilon . v . d\lambda}{\int_{4000}^{7000} \varepsilon . d\lambda} = 0{,}38 \text{ (circa)}$$

Questa diminuzione, da 1 a 0,38, del massimo *rendimento* sperabile, rappresenta il *costo*, per così dire, della condizione che la luce artificiale sia simile a quella diurna.

Un uso, infine, che va generalizzandosi, è quello di individuare praticamente il grado di perfezione d'una lampada mediante il valore di una grandezza di evidente ed immediato interesse, la così detta *efficienza;* la quale viene definita sia come il *numero di unità di luce che la lampada emette per ogni unità di energia consumata;* sia, essendo più comodo considerare i *flussi luminosi* (1) (cioè, le quantità di luce emesse in ogni unità di tempo) e le *potenze* consumate, come *il numero di unità di flusso luminoso emesse per ogni unità di potenza assorbita*. La efficienza così definita è proporzionale al rapporto η di poc'anzi.

Il complesso delle ricerche sperimentali di questi ultimi dieci o quindici anni autorizza ad affermare che se una sorgente di luce emettesse esclusivamente radiazioni monocromatiche $\lambda = 5560$ *U.A.*, la sua efficienza raggiungerebbe circa i 630 *lumen per Watt;* se invece emettesse esclusivamente luce bianca, la efficienza sarebbe di circa 250 *lumen per Watt*. L'approssimazione di queste cifre è modesta, dell'ordine presumibile del 5 per cento; ma non è per questo meno grande l'interesse delle cifre stesse, le quali segnano i limiti estremi teoricamente prevedibili nei riguardi del perfezionamento delle sorgenti artificiali di luce. E se si trattasse di lampade a fiamma, sostituendo il Watt col corrispondente numero di calorie consumate nell'unità di tempo (1 Watt-secondo equivale a 0,2389 piccole calorie) le due ricordate efficienze massime risulterebbero rispettivamente di 2600 *lumen* e di 1050 *lumen per piccola caloria consumata in ogni secondo*.

* * *

2. - *Cenni sulla «emissione» dei corpi.*

Per costringere i corpi ad emettere dell'energia raggiante visibile si conoscono oggi due metodi fondamentali, talvolta impiegati contemporaneamente:

a) elevare a sufficienza la temperatura del corpo;

b) eccitare, quando il corpo si presti, la produzione di fenomeni di *luminescenza*.

Il metodo della *emissione di temperatura* viene più specialmente seguito quando si tratti di corpi *condensati* (solidi e liquidi). Questi corpi, difatti, hanno notoriamente una emissione a spettro continuo; crescendo la temperatura, aumenta la quantità di tutte le radiazioni emesse, ma l'aumento è relativamente tanto maggiore quanto minore è la lunghezza d'onda. E poichè alle temperature ordinarie l'emissione più intensa si verifica nell'ultrarosso, l'aumento

(1) Nella presente nota, il significato di tutte le locuzioni di carattere fotometrico è quello precisato dal *Vocabolario della Illuminazione*, pubblicato nel 1924 dal Comitato Nazionale Italiano della Illuminazione e del Riscaldamento (Roma, Via Poli, 14) e riprodotto dal Giornale *L'Elettrotecnica* (1924, pag. 482).

Anche le unità fotometriche usate nella presente nota sono quelle precisate dal Vocabolario di cui sopra, ed adottate da tempo dalla *International Commission on Illumination;* e cioè la *candela internazionale* (equivalente a 1,11 candele Hefner), il *lumen* int., il *lux* int., ecc.

Si ricorda ancora che uso antico poco razionale era quello di individuare la potenza luminosa delle lampade mediante la loro *intensità luminosa* (misurata in *candele*); ed essendo questa intensità diversa nelle varie direzioni, si sceglieva generalmente la intensità luminosa massima; la quale, per altro, aveva un rapporto molto variabile (da un tipo di lampada all'altro) con la grandezza che meglio determina la capacità generica ad illuminare della lampada, e cioè col *flusso luminoso*.

Più recentemente si è quindi deliberato di individuare la accennata potenza luminosa mediante appunto il flusso (misurato in *lumen*). È superfluo ricordare (nei riguardi della relazione fra intensità e flusso) che se una lampada avesse in tutte le direzioni la stessa intensità I, questa sarebbe anche la così detta *intensità media sferica* della lampada e quindi fra intensità e flusso Φ correrebbe la relazione $\Phi = 4\pi . I$. Se per altro la lampada non presenta questa uniformità, e se nella relazione precedente si introduce la intensità massima, il coefficiente 4π andrà sostituito con un numero *minore*. A titolo d'orientamento, si accenna che in molti tipi comuni di lampade ad incandescenza si ha approssimativamente: $\Phi = 10 . I_m$, essendo I_m la intensità massima indicata dal fabbricante.

Digitized by Google

di temperatura farà crescere doppiamente l'energia raggiante *visibile* che il corpo emette.

Per trasformare in energia raggiante visibile la maggior proporzione possibile della energia che si somministra ad un corpo, converrà dunque elevare il più possibile la temperatura di quest'ultimo (1).

Ma i varî corpi presentano tuttavia notevoli differenze di comportamento fra di loro; a parità di temperatura raggiungibile, è dunque tutt'altro che indifferente l'impiegare come sorgente di luce un corpo oppure un altro. Il *corpo nero* si presenta notoriamente, per il principio di Kirchhoff, come il corpo che, a parità di temperatura e di area, emette il massimo possibile di luce, non però come il corpo che possa consentire il massimo rendimento nella trasformazione in radiazioni visibili di altre forme d'energia; chè esso emette nella maggior misura possibile anche le radiazioni non utili, cioè, esterne allo spettro visibile. Ammessa per l'emissione del corpo nero la validità delle note leggi di Stefan, di Wien e di Planck, e per le costanti che vi figurano i valori generalmente accettati, se ne deduce che a 1700° K. l'energia irradiata dal corpo nero fra 4000 e 7000 *U.A.* rappresenta poco più del 2 *per mille* dell'energia totale; che a 2700° *K.* si giunge al 5 *per cento* circa; e che la frazione di radiazioni visibili giunge al suo valore massimo, prossimo al 40 *per cento*, a circa 5500° K., nelle quali condizioni la efficienza è dell'ordine dei 100 lumen per Watt.

Risultati più favorevoli sono dati da altri corpi i quali, pur essendo *neri* (o *grigi*) per le radiazioni visibili (ciò che può essere avvertito dall'occhio), sono *bianchi*, o quasi, per il resto dello spettro; e fra questi uno dei più interessanti (per le elevate temperature che può sopportare) è il *tungsteno*. Irregolare è l'andamento della emissione negli *ossidi*, taluni dei quali (ossidi di torio, cerio, zirconio) a causa delle loro favorevoli proprietà hanno trovato largo uso nella illuminazione a gas, e qualche impiego anche nella illuminazione elettrica (Nernst).

Più complessa, dal punto di vista che qui interessa, è la questione della emissione degli aeriformi. A differenza dei corpi condensati, gli aeriformi hanno, come è noto, uno spettro d'emissione *discontinuo*, costituito da aggruppamenti più o meno complessi di *righe*, ciascuna delle quali è in realtà una ristrettissima porzione dello spettro, distribuite lungo lo spettro senza apparente regolarità. In taluni casi di spettri semplici (*H*, *He*, ecc.) si è riusciti da tempo a constatare l'esistenza di regolarità indirette, consistenti nella circostanza che le lunghezze d'onda o le frequenze di certe righe sono ordinatamente espresse da una stessa formola semplice, purchè ad uno (o più) dei paramenti che vi figurano vengano successivamente attribuiti valori numerici interi. In principio tali relazioni hanno avuto carattere solamente empirico; ma di recente si è riusciti a scoprirne una possibile genesi teorica di grandissimo interesse, originata dalle attuali vedute sulla struttura interna dell'atomo e sul meccanismo (quantistico) della emissione, la quale ha persino condotto a previsioni, confermate poi dalla esperienza, sulla esistenza di certe righe e sulla loro appartenenza allo spettro di uno piuttostochè d'un altro corpo semplice.

Un punto che qui specialmente interessa è il variare della intensità e del numero delle righe col variare delle condizioni in cui l'aeriforme si trova. Ora, l'esperienza non rivela dipendenze semplici (del tipo, ed es., di quelle già accennate per i corpi condensati) fra gli elementi di cui sopra e la temperatura; anzi, alla domanda se la emissione degli aeriformi sia *essenzialmente di temperatura*, sembra doversi dare una risposta negativa, almeno per quello che riguarda lo spettro visibile. Anche senza entrare a discutere particolarmente la delicata questione (lo scopo delle presenti pagine nè lo richiede, nè lo consente), può rilevarsi che mentre vi sono numerosi casi in cui un aeriforme emette senza che siano constatabili aumenti della sua temperatura, o, almeno, aumenti in ragionevole rapporto con la emissione (tubi di Geissler e di Plucker, lampade a neon ed a vapori di *Hg.*, ecc.), invece si riscontra sempre, tutte le volte che una emissione si verifica, la presenza di cause notoriamente capaci di eccitare fenomeni di luminescenza. Si può dunque ritenere, per quello che qui interessa, che la *emissione luminosa degli aeriformi sia (almeno prevalentemente) di luminescenza*, e che la temperatura non abbia che una importanza secondaria. Non si conoscono ancora leggi semplici di carattere generale regolanti la dipendenza fra le cause della luminescenza e l'effetto ottenuto.

Il carattere discontinuo degli spettri di emissione degli aeriformi rende assai difficile l'ottenimento della luce bianca. Nel caso delle emissioni di temperatura dei corpi condensati, si trattava soltanto di correggere le differenze di proporzione fra le varie radiazioni; qui, invece, si tratta addirittura di rimediare alla assenza di parte delle radiazioni. Nel primo caso, lo scopo è teoricamente raggiungibile diminuendo a sufficienza la intensità delle radiazioni che nella luce artificiale appaiono relativamente più abbondanti, ciò che può ottenersi in modo semplice con l'impiego di filtri di luce adatti (i quali, in generale, debbono essere relativamente poco trasparenti dal giallo al rosso; si usano ad es. vetri all'ossido di cobalto). Ma nel secondo caso non vi è altro rimedio che cercare un aeriforme, se esiste, il quale abbia una tale distribuzione di righe nelle varie parti dello spettro visibile da dare una luce che non manchi dei rappresentanti (per così dire) di nessuna delle parti principali dello spettro; oppure, accoppiare due o più aeriformi (cioè, in generale, due o più lampade) i cui spettri siano quanto più complementari è possibile. Non si conosce attualmente che la anidride carbonica la quale, in condizioni convenienti, sia discretamente adatta (a parte la bassa *efficienza*) a fornire la prima di queste soluzioni; gli altri aeriformi oggi adoperati hanno degli spettri incompleti e poco adatti a completarsi mutuamente.

La emissione per luminescenza si presenta anche

(1) Finchè, s'intende, sia verificato il fatto sopra ricordato che il massimo d'emissione si verifichi per lunghezze d'onda maggiori di quelle alle quali corrisponde la massima *visibilità*; cioè fin verso temperature dell'ordine di 5500° o 6000° *K.*

Digitized by Google

nei corpi condensati ed in un gran numero di fenomeni; ma la sua importanza attuale per la produzione artificiale della luce è limitata. Il tentativo forse più interessante che sia stato fatto, senza per altro grandi risultati, è quello di utilizzare fenomeni di luminescenza di schermi solidi (imbevuti, per es., di soluzioni a base di *rodamina*) per correggere le gravi deficienze (verso l'arancio ed il rosso) dello spettro della luce emessa dalle lampade a vapori di mercurio.

Si deve però notare che proprio alla categoria dei fenomeni di luminescenza dei corpi condensati appartengono gli esempi di produzione della luce ai quali corrispondono, in un certo senso, le massime efficienze conosciute; si allude qui agli esempi di luminescenza che offrono taluni animali, e specialmente certi insetti, dei quali il più noto nei nostri Paesi è la lucciola. Dalle ricerche fatte in proposito risulta che in certi organi di questi insetti avviene periodicamente la alterazione, al contatto dell'aria, di una particolare sostanza suscettibile poi di rigenerazione per il contatto con un'altra sostanza, egualmente prodotta dall'organo; ed è, con tutta probabilità, il fenomeno chimico dell'alterazione (ossidazione) che dà origine ad una emissione di energia raggiante per luminescenza, emissione ristretta generalmente alle sole zone verde-giallo-arancio dello spettro. Il rapporto $\eta = \frac{\int_0^\infty \varepsilon\, v.\, d\lambda}{\int_0^\infty \varepsilon\, d\lambda}$ è quindi vicino all'unità; ma per concludere (come troppo spesso vien fatto) che il fenomeno chimico di cui sopra rappresenti il mezzo pressochè ideale per la produzione artificiale della luce, bisognerebbe ancora poter escludere (e mancano oggi elementi di giudizio sufficienti) che il fenomeno stesso non dia luogo a dispersioni di energia sotto altra forma; bisognerebbe dimostrare, in altri termini, che la quantità $\int_0^\infty \varepsilon.\, d\lambda$ rappresenta *tutta* la quantità d'energia che deve considerarsi spesa per la produzione dell'interessantissimo fenomeno.

II. - ORIGINI E SVILUPPO DEI VARI SISTEMI DI ILLUMINAZIONE ELETTRICA.

3. - *Classificazione dei vari sistemi di illuminazione elettrica.*

I fenomeni elettrici si prestano in vario modo a fornire a corpi adatti l'energia occorrente per costringerli ad emettere delle radiazioni visibili.

I principali tipi di lampade elettriche oggi note possono dividersi in tre gruppi, per quanto la divisione non possa essere del tutto netta: *lampade ad incandescenza, lampade ad arco,* e *lampade ad elettroluminescenza.*

Dal punto di vista concettuale, le più semplici sono quelle ad incandescenza, fondate sulla utilizzazione diretta del fenomeno Joule. Da quanto è stato detto nel § 2, risulta che converrà scegliere corpi conduttori capaci di essere ridotti in filamenti e di sopportare a lungo temperature molto elevate; e, fra questi, preferire quei corpi che siano *neri* più nell'ambito dello spettro visibile che nel resto. Sono state così messe in commercio, successivamente, le lampade costituite da *filamenti di carbone, di platino, di iridio, di tantalio, di osmio, di zirconio, di tungsteno* (che è il metallo oggi usato), portati all'incandescenza entro palloncini di vetro in cui sia stato fatto il vuoto; lampade a *bastoncino di ossidi,* reso incandescente in seno all'aria; e, più di recente, lampade a *filamento di tungsteno portato all'incandescenza entro una atmosfera gassosa* chimicamente inerte (azoto, argon).

Il secondo importante gruppo di lampade deriva dal fenomeno dell'arco elettrico, che si manifesta, come è noto, tutte le volte che si allontanino leggermente due conduttori primitivamente in contatto e fra i quali venga mantenuta una sufficiente differenza di potenziale. Le modalità quantitative e qualitative del fenomeno dipendono grandemente dalla natura dei conduttori e dal mezzo in cui l'arco si svolge. La luce emessa ha carattere molto complesso, essendo generalmente la somma della emissione per temperatura degli estremi incandescenti dei conduttori (si tratterà di luce a spettro continuo, § 2) e della emissione dell'arco gassoso, che sarà, parzialmente o totalmente, una emissione per luminescenza (a spettro di righe o di bande). Si è riconosciuto presto che uno dei corpi più adatti a costituire gli elettrodi era il *carbone;* ed a seconda della qualità degli elettrodi si possono oggi distinguere le *lampade ad arco fra carboni puri, carboni a miccia* (carboni *a fiamma*), *carboni mineralizzati,* ecc. Un adatto *meccanismo regolatore,* provvede, in generale, ad avvicinare gli elettrodi man mano che essi si consumano.

Sono state usate anche lampade ad arco nelle quali uno almeno degli elettrodi è a base di ossidi metallici; e fra di esse va ricordata la lampada a *magnetite.*

Notevole importanza hanno altresì le l. ad arco fra *elettrodi metallici;* e principalmente quelle fra *elettrodi di tungsteno* e fra *elettrodi di mercurio* (o di mercurio e ferro). S'impiegano oggi l. *con elettrodi di tungsteno, nell'aria,* allorchè interessa che sia intensa la emissione non solo nello spettro visibile, ma anche nell'ultravioletto; e l. con *piccoli elettrodi di tungsteno* entro palloncini di vetro, vuotati di aria, allorchè si vuole realizzare una sorgente di luce puntiforme il più possibile (lampade Pointolite, ecc.). Elettrodi di ferro (ed anche di rame) sono usati per scopi speciali, come la produzione di determinati spettri di righe. Nelle l. *a vapori di mercurio,* gli elettrodi (tutte e due di mercurio oppure uno di mercurio ed uno di ferro) sono contenuti entro un recipiente di vetro dal quale è stata estratta l'aria; la luce è fornita dall'arco propriamente detto, formato dai vapori *luminescenti* di mercurio.

Per altro, la l. a vapori di *Hg.* va piuttosto considerata come un tipo intermedio fra il gruppo delle l. ad arco e quello delle *lampade ad elettroluminescenza,* fondato sulla nota proprietà che hanno i gas rarefatti di diventare sede di fenomeni di luminosità allorchè nel loro interno si trovino due elettrodi ad una differenza di potenziale sufficientemente alta. Anche qui, sono soltanto gli aeriformi che diventano luminosi,

Digitized by Google

fornendo caratteristici spettri discontinui; le modalità del fenomeno (colore ed intensità della luce, differenza di potenziale occorrente, ecc.) dipendono dalla loro natura e dalla loro pressione.

I rappresentanti più antichi di questo gruppo sono i tubi di *Geissler* e di *Plucker*, usati anche oggi per usi scientifici; hanno acquistato, per altro, una qualche diffusione sia le così dette lampade Moore (nelle quali si adoperano l'azoto e l'anidride carbonica) sia, sopratutto (a causa della differenza di potenziale relativamente minore che richiedono), le lampade a *neon*.

* * *

4. - *Generalità sullo sviluppo della illuminazione elettrica.*

È stato accennato (§ 1) come lo studio dei fenomeni costituenti il fondamento dei due sistemi più importanti di illuminazione elettrica, ad incandescenza e ad arco (§ 3), sia stato iniziato relativamente assai presto. Ma queste ricerche richiedevano la disponibilità di correnti piuttosto intense e costanti, quali difficilmente potevano essere fornite dai primitivi tipi di pile voltaiche. Fu perciò soltanto intorno al 1840 che, attenuatesi le difficoltà in seguito alla invenzione di più adatti tipi di pile (Grove, Bunsen, Poggendorff, ecc.), potè pensarsi da qualche ricercatore a possibili applicazioni di questi fenomeni e cominciarono i tentativi di trasformare i dispositivi sperimentali da laboratorio in guisa da giungere alla costruzione di vere e proprie lampade elettriche.

Il primo brevetto di cui si abbia notizia per una lampada costituita da un conduttore portato all'incandescenza entro un palloncino di vetro, venne preso nel 1841 (De Moleyns); nel 1845 venne brevettato il primo tipo di l. ad arco (Wright) nella quale una certa stabilità della luce, malgrado il consumo degli elettrodi, venisse ottenuta mediante un regolatore *automatico* (il quale produceva la lenta rotazione degli elettrodi di carbone, aventi la forma di dischi); ed i progressi dei *regolatori* furono così rapidi, che già nel 1849 poteva essere fatto con discreto successo il primo esperimento pubblico di illuminazione elettrica con lampade ad arco a carboni cilindrici (Teatro dell'Opera, di Parigi; lampade Foucault-Dubosq).

Ma i tempi non erano maturi. Intanto, l'opinione pubblica non riconosceva ancora abbastanza la opportunità di migliorare i sistemi d'illuminazione allora usati; era ancora vicina l'epoca in cui, a proposito degli inizi di illuminazione pubblica a gas di fossile (intorno al 1820) s'era da varie parti protestato contro la *eccessiva luce* emessa dalle nuove lampade: le modeste l. a fiamma libera! Sopratutto, l'unico mezzo noto per la produzione di correnti intense e durevoli, l'impiego delle pile, riusciva ingombrante e scomodo e forniva l'energia elettrica ad un costo praticamente proibitivo.

Devesi al riguardo ricordare che le reali possibilità di diffusione d'un sistema d'illuminazione dipendono grandemente dal *costo* della forma di energia o dei materiali consumati (§ 1). Ora, l'energia elettrica ha sempre avuto (specie in passato) ed ha ancora oggi un costo di produzione ed un valore industriale assai maggiore di quello di altre forme di energia che possono pure prestarsi per la realizzazione di sorgenti di luce. Attualmente, ad es., nel nostro Paese il costo (tutto compreso) del chilowattora (usato a scopo di illuminazione) è dell'ordine di almeno 1,50 lire-carta (cambio 450/100), mentre quello della quantità di gas di fossile occorrente per sviluppare (sotto forma di calore) la quantità equivalente di energia (circa 860 grandi calorie; si ammette un *calore di combustione superiore* del gas pari a 4000 calorie per mc., ed un prezzo unitario di 80 cent.-carta al mc.) è solo di 20 cent.-carta; poco maggiore è il costo della quantità di petrolio corrispondente (ammesso un *calore di combustione superiore* di 10.000 calorie per Kg. ed un prezzo di 2,50 lire-carta al Kg.). Ed è noto che l'energia elettrica ottenibile per mezzo di pile è ancora di gran lunga più costosa di quella producibile per mezzo di grandi centrali idro o termoelettriche (1). Si spiega così come la possibilità pratica della illuminazione elettrica e di tante altre applicazioni dell'energia elettrica non sia apparsa che più tardi, all'epoca delle invenzioni riguardanti le macchine per la produzione economica dell'energia elettrica mediante la trasformazione diretta dell'energia meccanica (nel 1865, Pacinotti inventava l'indotto ad anello; intorno al 1870, Gramme metteva in commercio le prime macchine; nel 1873, Hefner Alteneck inventava l'indotto a tamburo; e così via); invenzioni che diedero difatti nuovo impulso alla ricerca di lampade elettriche capaci di reggere, anche dal lato economico, il confronto con altri sistemi di illuminazione.

Nel 1876 compariva la così detta *candela* (ad arco) Jablochkoff, il primo tipo di lampada elettrica che riuscisse a destare per qualche tempo l'interesse generale, formata da due asticine di carbone, mantenute parallele ed a piccola distanza da un isolante interposto, fra le quali veniva prodotto l'arco, che si manteneva con discreta regolarità a causa del consumo simultaneo dei due elettrodi: intorno all'80 venivano messe in commercio (Edison) le prime lampade ad incandescenza di uso pratico, a filamento di carbone nel vuoto; e le lampade ad arco vere e proprie progredivano ancora rapidamente, col perfezionarsi della costruzione dei regolatori e della fabbricazione dei carboni. Alla divulgazione dei vantaggi dei nuovi sistemi di illuminazione contribuirono potentemente le esposizioni internazionali interamente dedicate alle applicazioni elettriche; meritano particolare ricordo la prima di esse, che ebbe

(1) In uno dei tipi più economici di pile adatte per correnti prolungate, e cioè il tipo a solfato di rame, ritenendo che il valore del rame che si deposita possa compensare quello dello zinco che si consuma, il costo si riduce sostanzialmente a quello del solfato di rame che si consuma, più le quote di mano d'opera, manutenzione, interessi e ammortamento dell'impianto. Anche ammessi rendimenti vicinissimi all'unità (praticamente non raggiungibili) il consumo (minimo prevedibile) di solfato di rame è di circa 3 Kg. per kWh; ciò che, ad es., ai prezzi attuali, implica una spesa, *per questo solo titolo*, non minore di L. 7 (carta) per kWh.

Digitized by Google

luogo a Parigi (1881), e quella di Torino (1884) nella quale figurò per la prima volta il trasformatore; verso il 1884-85 erano quindi già numerosi gli esempi di illuminazione elettrica pubblica e privata.

Verso quell'epoca, le efficienze medie delle lampade ad incandescenza, delle candele Jablochkoff e delle lampade ad arco erano prossime, rispettivamente, a 2 lumen per Watt, 5 lumen per Watt e 8 lumen per Watt; il prezzo del kW-ora, prodotto naturalmente con modeste centrali termiche, poteva mediamente stimarsi dell'ordine di 1 lira-oro; il costo del lumen-ora elettrico poteva dunque ritenersi compreso (incluse le spese accessorie) fra 0,01 e 0,06 cent.-oro, a seconda del tipo di lampada. Assai minore era la efficienza delle lampade a gas, variabile da circa 0,7 lumen per litro di gas all'ora (efficienza equivalente, supposto in 5,5 grandi calorie per litro di calore di combustione superiore del gas allora adoperato, ad appena 0,1 lumen per Watt) nel caso delle fiamme libere, a circa 1,5 lumen per litro, all'ora, nel caso delle lampade a ricupero di calore; ma assai minore era il costo della forma di energia adoperata, tanto che, ammesso un prezzo del gas di fossile dell'ordine dei 30 cent.-oro per mc., il costo del lumen-ora risultava compreso (incluse le spese accessorie) fra circa 0,02 e 0,045 cent.-oro.

Le cifre precedenti, pur non potendo pretendere che ad un valore di primo orientamento (data la grande variabilità, con le condizioni locali, dei costi del kWh e del mc. di gas) sono per altro sufficienti a mostrare che i due sistemi di illuminazione conducevano a costi di ordine poco diverso (le lampade ad arco, più economiche, avevano un campo d'impiego relativamente ristretto); stava dunque per iniziarsi una feconda gara, di cui i tecnici del gas cominciavano ad occuparsi seriamente (data dal 1885 il primo studio, dello Schilling, sulla questione), quando la illuminazione a gas fece un grande progresso, che le dette per il momento causa vinta, mercè gli studi di Auer; il quale, riprendendo idee già antiche (Frankenstein, 1848) e perfezionandone grandemente la realizzazione, rese pratico (1885-86) l'uso del sistema ad *incandescenza* e fece salire la efficienza della illuminazione a gas intorno a 4 o 5 lumen-ora per litro, riducendo immediatamente il costo medio del lumen-ora, tutto compreso, al disotto di 0,01 cent.-oro, anche per lampade di modesta potenza.

La posizione relativa dei due sistemi di illuminazione andò per altro gradatamente modificandosi, negli anni che seguirono, per la maggior rapidità dei progressi fatti nella costruzione delle lampade elettriche e l'abbassarsi del costo del kWh, dovuto all'estendersi ed al perfezionarsi degli impianti di distribuzione ed alla importanza crescente degli impianti idroelettrici.

I tecnici del gas dovettero difatti riconoscere (ed esperienze recentissime l'hanno confermato) che non v'era, per le reticelle ad incandescenza, miscela più adatta di quella già indicata da Auer; non mancò tuttavia qualche ulteriore notevole progresso nella efficienza delle l. a gas, specie per l. di media e grande intensità (l. a fiamma rovesciata, a ricupero intenso, ad alta pressione, ecc.). Ma nel campo della illuminazione elettrica, mentre da un lato le l. ad arco guadagnavano gradatamente in regolarità ed efficienza (intorno al 1900 comparivano le l. Bremer, con i primi carboni mineralizzati, di efficienza superiore ai 25 lumen per Watt, cifra superata in seguito), dall'altro, raggiunte con le l. a filo di carbone efficienze di circa 3 lumen per Watt, cominciavano (pure intorno al 1900) i tentativi per sostituire il filamento di carbone con filamenti più adatti. Risultati pratici furono otteunti poco dopo, e furono seguiti dalla introduzione sul mercato delle prime lampade a filamento metallico nel vuoto (tantalio, osmio, tungsteno, ecc.); un secondo grande progresso fu l'applicazione, intorno al 1909, di procedimenti pratici di trafilatura diretta del tungsteno (il metallo che s'era rivelato il più adatto), capaci di dare filamenti resistenti sia ad urti e scosse, sia ad un regime termico corrispondente ad una media di 8 o 9 lumen per Watt; un terzo passo è stato fatto intorno al 1913, con la invenzione delle lampade a riempimento di gas inerte, le quali permettono di ottenere, per le medie e grandi potenze, 15 (e persino 20) lumen per Watt: cioè, una efficienza dello stesso ordine di quella delle lampade ad arco, pure senza i caratteristici difetti di queste ultime (§ 6). Queste cifre spiegano la grande prevalenza presente del sistema di illuminazione elettrica ad incandescenza sopra tutti gli altri.

Pur non essendo possibile istituire dei confronti economici precisi di carattere generale, anche a causa delle grandi diversità fra i diversi mercati, potranno interessare i dati della tabella che segue, la quale riassume, con particolare riferimento ai prezzi del mercato italiano, la posizione economica attuale rispettiva dei principali sistemi di illuminazione.

Nel nostro Paese, il consumo annuo di energia elettrica per illluminazione, che nel 1895 era di soli 10 milioni di kWh, è salito rapidamente a 32 milioni nel 1900, a 146 milioni nel 1910, a 369 milioni milioni nel 1920 ed a 595 milioni nel 1925, con un incremento annuo (nell'ultimo periodo) dell'ordine del 12 %. Questi consumi hanno costantemente rappresentato dal 7 al 10 %, circa, della produzione totale (nel 1910, ad es., la produzione totale è stata di 1470 milioni di kWh.; nel 1925 è stata di 7100 milioni) ma a causa del prezzo unitario relativamente più alto a cui si vende l'energia per uso luce, hanno generalmente fornito, da soli, da ⅓ ad ½ dell'introito totale delle Società distributrici d'energia.

La cifra di 595 milioni di kWh (1925) corrisponde, supposta una efficienza media di 12 lumen per Watt, alla produzione di circa 7.000.000 di milioni di lumen-ora all'anno, cioè, a circa 15 kWh (oppure 175.000 lumen-ora) per persona e per anno, in media. Le cifre effettive variano però notevolmente da regione a regione; ad es., nel 1925 il consumo annuo medio di energia a scopo di luce ha raggiunto il minimo nella Basilicata (2,7 kWh per persona) nella Calabria (3,4) e nelle Puglie (4,5) ed il massimo nel Piemonte (25), Lombardia (28,2), Liguria (29,4) e nel Lazio (37); fra le grandi città, il minimo spetta a Bari (5) ed il massimo a Milano (46).

Dalle statistiche mondiali, per quanto incomplete,

Digitized by Google

Tipo di lampada	Limiti usuali di potenza luminosa (in lumen)	Ordine di grandezza delle efficienze medie riferite all'energia od al materiale consumato	ridotte in lumen per Watt	Prezzo unitario medio (in lire-carta) in Italia (1926) dell'energia o del materiale consumato	Costo medio approssimativo di 1000 lumen-ora in cent. carta (1926) (cambio 450 %)	in cent. oro
Candele di paraffina	2– 20	1 lumen per gr/ora	0,1	L. 10 al Kg.	1250	275
Lampade ad olio	5– 100	2 » » »	0,2	» 9 » »	500	110
L. a petrolio usuali	100– 300	3 » » »	0,3	» 2,50 » »	100	22
L. a petrolio ad incand.	300– 5.000	8 » » »	0,7	» 2,50 » »	40	9
L. ad acetilene	50– 1.500	12 » » lit/ora	0,7	» 1,80 per Kg. di carburo di calcio	60	13
L. a gas ad incandescenza, tipo usuale a fiamma diritta o rovesciat.	200– 1.000	4 » per lit./ora (gas da 4 cal. sup. per litro)	0,9	» 0,80 al mc.	25	5,5
L. a gas ad incandescenza, tipi a gas compresso ed a ricupero.	1.500–10.000	8 » per lit./ora (gas da 4 cal. sup. per litro)	1,8	» 0,80 al mc.	15	3,3
L. elettriche ad incandescenza a fil. di tungsteno nel vuoto.	50– 1.000	8 lumen per watt (v. § 5)	8		20	4,5
L. elettriche ad incandescenza a fil. di tungsteno in gas inerte.	500–30.000	14 lumen per Watt (v. § 5)	14		12	2,5
L. elettriche ad arco, corrente alternata, carboni usuali a miccia.	3.000–20.000	10 lumen per Watt	10	» 1,50 per kW-h.	18	4
L. elettriche ad arco, corr. continua, carboni usuali a miccia.	5.000–20.000	15 lumen per Watt	15		13	3
Id. corr. alternata, carboni speciali	5.000–30.000	sino a 35 lumen per W.	35		7	1,5

N. B. Le cifre delle ultime due colonne comprendono anche i valori medi dei consumi accessori (ricambi, mano d'opera, resistenze addizionali, ecc.). I consumi specifici (in Watt per candela) molto bassi (a cui dovrebbero corrispondere efficienze molto elevate) che si trovano in alcune pubblicazioni nei riguardi di talune lamp. (quelle ad arco, p. es.) sono apparenti, in quanto si riferiscono ad intensità luminose diverse da quella media sferica, la sola che abbia un rapporto costante col flusso emesso (ad ogni « candela » di intensità media sferica corrispondono 12,6 lumen).

sulla produzione ed il consumo d'energia elettrica; appare infine che intorno al 1925 la produzione annuale mondiale d'energia elettrica poteva stimarsi in 160 miliardi di kWh e che il consumo per la luce era prossimo ai 18 miliardi di kWh all'anno, rappresentanti da soli un valore commerciale di oltre 30 miliardi di lire carta (cambio 450/100), all'anno. Ma le statistiche mostrano altresì che l'energia elettrica rappresenta mediamente poco più della metà (52 %) del totale movimento d'affari relativo alla illuminazione elettrica; il resto riguarda i materiali elettrici (25 %), la mano d'opera (15%) (occorrente per la manutenzione, le trasformazioni ed i nuovi impianti) e, infine, le lampade (8 %). Si può dunque affermare che la industria della illuminazione elettrica dà attualmente luogo ad un movimento mondiale di affari dell'ordine dei 50 miliardi di lire carta (cambio 450/100) all'anno.

* * *

5. - *I progressi della illuminazione elettrica ad incandescenza.*

Non soltanto (§ 2) il corpo luminoso delle lampade elettriche ad incandescenza deve poter sopportare a lungo senza alterarsi temperature molto elevate ed avere, quanto più è possibile, una emissione intensa nella zona dello spettro visibile e debole nel resto dello spettro; una considerazione pratica impone altresì che esso abbia (a caldo) una resistenza relativamente elevata. Sono note, difatti, le ragioni per le quali nella distribuzione dell'energia elettrica debbono adottarsi differenze di potenziale non troppo basse; raramente si scende al disotto d'un centinaio di Volt. Ora, le potenze luminose più richieste possono già ottenersi con lampade consumanti solo qualche diecina di Watt; ed affinchè

Digitized by Google

l'espressione $\frac{I^2}{R}$ abbia questi valori, occorre che R sia dell'ordine di alcune centinaia di ohm. Essendo ancora necessario che la superficie del corpo sia piccola (chè poco occorre, data l'alta temperatura, per irradiare poche diecine di Watt (1), bisognerà ricorrere a corpi di alta resistenza specifica, oppure suscettibili di essere ridotti in filamenti molto sottili.

Tutte queste condizioni restringono singolarmente il campo della scelta. Lasciati da parte il platino, l'iridio e le loro leghe (De Moleyns, 1841 ; Starr 1845 ; Staite, 1848, ecc.), essenzialmente a causa della temperatura di fusione relativamente bassa (per il Pt., 1765° C ; per l'Ir., 2340°C), si pensò da varie parti al carbone, avente simultaneamente una temperatura di fusione assai più alta (intorno a 4100°C) ed una resistività assai maggiore dei metalli ; e si cercò di ottenerne delle striscie o dei filamenti per mezzo della carbonizzazione, fuori del contatto dell'aria, di adatte sostanze organiche. Modesto successo ebbe l'impiego di striscioline di cartoncino o di fili di cotone carbonizzato (1879, Edison, Swan, Lane-Fox, Maxim ; efficienze dell'ordine di circa 1,4 lumen per Watt ; vita dei filamenti, qualche diecina di ore) ; risultati molto migliori dette l'impiego di fibre di bambù carbonizzate (Edison, 1880), con le quali l. venne fatto il primo impianto importante d'illuminazione ad incandescenza (piroscafo Columbia, 1880) ; un ulteriore importante progresso venne fatto nel 1883 con l'impiego di filamenti ottenuti dalla carbonizzazione di pasta di cellulosa trafilata (efficienza, intorno ai 2,5 lumen per Watt ; vita, parecchie centinaia di ore) ; mentre, d'altra parte, le lampade andavano sempre più avvicinandosi al semplice e caratteristico aspetto moderno. Intorno al 1892 venivano immaginati dei procedimenti atti a rendere i filamenti carbonizzati più omogenei (*nutrizione*) e capaci di resistere qualche centinaio di ore ad un regime di circa 3 lumen per Watt ; nel 1905 venivano messe in commercio (Howell) le lampade a filamento così detto *metallizzato* (ottenuto mediante un lungo ed appropriato riscaldamento al forno elettrico, a temperatura superiore a 2300°C., dei filamenti *nutriti* di cui sopra), capace di dare efficienze maggiori (intorno ai 4 lumen per Watt), ma un po' fragile.

Fu presto rilevato che, per altro, il carbone ha due gravi difetti. La massima temperatura alla quale conviene mantenere il filamento d'una l. ad incandescenza non è già determinata, come potrebbe credersi, dalla necessità di evitare l'eccessiva prossimità della temperatura di fusione (2) ; bensì dalla entità del fenomeno di sublimazione del filamento, e da quella di eventuali mutamenti di aggregazione molecolare (per es., la cristallizzazione). *Questi fenomeni possono diventare sensibili anche molto prima della temperatura di fusione* e riescono assai dannosi per due ragioni ; da un lato, le particelle uscite dal filamento, depositandosi nella parete interna del palloncino, lo anneriscono gradatamente provocando una diminuzione crescente del flusso luminoso utile ; dall'altro, l'assottigliamento del filamento e la sua crescente disuniformità provocano sopraelevazioni di temperatura le quali (anche se locali) finiscono col condurre alla rottura. In generale, più alta è la temperatura del filamento e più breve risulta la *vita* della lampada ; sicchè, con l'elevarsi della temperatura diminuisce bensì (per l'aumentata efficienza) la spesa d'energia necessaria per ottenere un determinato flusso luminoso, ma cresce la quota di ammortamento del costo della lampada. È quindi evidente che esisterà una temperatura alla quale corrisponderà il minimo costo complessivo (fra energia e quota d'ammortamento) della luce ottenuta ; questa *temperatura economica* dipenderà anche dal costo unitario dell'energia elettrica e dal costo delle lampade.

Ora, il carbone ha bensì una temperatura di fusione alta, ma la sublimazione comincia così presto, che la *temperatura economica* dei filamenti risulta bassa, non superiore ai 1800°C. Si aggiunga che la loro emisssione è piuttosto simile a quella del corpo nero ; sicchè, risulta per doppia ragione assai abbondante la emissione di radiazioni non visibili, e bassa la efficienza.

Sono anteriori al 1900 i primi tentativi sistematici di sostituire il carbone con sostanze più adatte. Nel 1897, riprendendo idee antiche (1880, Lake) di utilizzazione di ossidi poco fusibili e dotati di favorevoli proprietà emissive (§ 2), veniva messa in commercio (Nernst) una l. che presenta ancora oggi qualche interesse. Il corpo incandescente è un bastoncino formato da un impasto di ossidi (generalmente a base di ossidi di zirconio o di torio) ; ma poichè questi impasti sono discretamente conduttori solo a caldo, la lampada deve anche contenere un appropriato dispositivo per il riscaldamento iniziale. La luce di questa lampada è relativamente bianca ; la efficienza è notevolmente migliore di quella delle l. a carbone (intorno ai 5 lumen per Watt, tenuto conto dei consumi accessori), ma non così alta come lascerebbero presumere le ottime proprietà emissive degli ossidi, a causa delle elevate perdite di calore per convezione ; modesta è la durata del bastoncino (poche centinaia di ore). I tentativi di far funzionare queste lampade nel vuoto, per eliminare le perdite per convezione, non hanno avuto seguito per il fatto che gli ossidi costituenti il bastoncino tendono (a caldo) ad alterarsi assai più rapidamente nel vuoto che nell'aria.

Successo di gran lunga maggiore hanno avuto i tentativi di sostituire il carbone con sottilissimi fili di metalli adatti (§ 2).

Le prime lampade d'uso abbastanza pratico furono quelle a filamento di osmio, e comparvero sul mercato nel 1902 (Auer) ; avevano una efficienza

(1) La superficie occorrente dovrebbe avere il valore minimo ove il corpo emettesse come il corpo nero. In base alle leggi d'emissione ricordate nel § 2 si calcola facilmente che alle temperature centigrade di 1500°-2000°-2500°-3000° ogni cm. q. di superficie del corpo nero irradia, rispettivamente, 57 Watt, 150 Watt, 340 Watt e 650 Watt.

(2) Per ragioni note, la costante elettrica fondamentale degli impianti di distribuzione (differenza di potenziale od intensità, a seconda dei casi) non può essere mantenuta rigorosamente costante ; variazioni irregolari di alcune unità per cento, sia in più che in meno del valore nominale, debbono oggi considerarsi come comuni.

Digitized by Google

prossima ai 5 lumen per Watt. Un paio d'anni più tardi comparvero le lampade a filamento di tantalio, di zirconio, ecc.; ma intorno al 1907 tutti questi tipi dovettero lasciare libero il campo alle lampade a filamento di tungsteno (Bredig, Kuzel, Pintsch,ecc.), del tipo ancor oggi in uso, che consente il raggiungimento di efficienze prossime agli 8 lumen per Watt, a causa della altissima temperatura di fusione e della forma favorevole della curva di emissione.

Difficoltà costruttive notevoli furono incontrate in principio nella preparazione dei filamenti, che a causa della relativamente piccola resistività specifica (peril tungsteno, a freddo, da 5,1 a 6,2 microhm-cm., a seconda che il filamento è ricotto o crudo ; a caldo, intorno ai 70 microhm-cm.) dovevano essere relativamente molto lunghi e sottili (1) : tanto più che questi metalli, il tungsteno compreso, erano assai duri e fragili. Per alcuni anni si impiegarono procedimenti consistenti generalmente nell'impastare il metallo, ridotto in polvere finissima (ottenuta dalla riduzione dei minerali, che sono quasi sempre ossidi : la wolframite, la scheelite, ecc.), con adatte sostanze agglutinanti (quasi sempre organiche : caseina, gomma arabica, celloidina, ecc.), trafilare poi la massa sotto pressione e trasformare i filamenti così ottenuti in filamenti di solo metallo per mezzo d'un conveniente riscaldamento in atmosfera gassosa adatta. Si ottenevano però necessariamente dei filamenti molto fragili ; e questo fu per qualche anno il principale grave difetto pratico delle nuove lampade a filamento metallico. Ma intorno al 1909, cominciarono a venir adoperati due altri procedimenti capaci, per vie molto diverse, di condurre a filamenti robusti e pieghevoli. Il primo non è che una variante del metodo antico ; variante consistente nella aggiunta, alla pasta di polvere di tungsteno e di agglutinante, di qualche unità per cento di ossido di torio, e nella modificazione dei trattamenti termici ai quali il filamento viene sottoposto. La ragione della grande influenza dell'ossido di torio sulle proprietà meccaniche dei filamenti è stata oggetto di numerose ricerche ; uno dei principî di spiegazione più attendibili è quello (Pintsch) che l'ossido di torio, per motivi che si ignorano, favorisca la trasformazione del pulviscolo incoerente di tungsteno in un vero cristallo unico, di tungsteno, cristallo che costituirebbe l'intero filamento ; questo assetto molecolare si conserverebbe (e se ne hanno indizi favorevoli) malgrado eventuali sollecitazioni meccaniche (piegature, trafilature) e durante il funzionamento della lampada.

Diffusione molto maggiore ha avuto ed ha oggi l'altro procedimento, di origine americana, puramente termico-meccanico. Esso consiste nella trasformazione preliminare della polvere di tungsteno in piccole barrette, mediante compressione a parecchie migliaia di atmosfere ; in riscaldamenti (per mezzo della corrente elettrica), spinti sin presso la temperatura di fusione (circa 3400°C), che conferiscono alle barrette una solidità sufficiente per i trattamenti successivi ; i quali si iniziano con una serie di martellature, a caldo, nel senso trasversale (fatte con ingegnose macchine automatiche), che riducono a poco a poco la sezione delle barrette, e proseguono (allorchè il diametro è diventato dell'ordine del millimetro) con trafilature vere e proprie, a caldo, attraverso filiere prima di acciaio *rapido* e poi di diamante. Per passare dalle barrette primitive al filo adatto alle lampadine occorrono alcune diecine di serie di martellature e oltre 200 trafilature consecutive. Si ottengono così anche filamenti di diametro poco maggiore di un centesimo di millimetro, e tenacissimi ; il carico di rottura può giungere ad oltre 400 Kg. per mmq. ! Il cambiamento nelle proprietà meccaniche viene attribuito alla struttura quasi fibrosa che il filo viene ad acquistare, derivando forse ogni microscopica fibra dall'allungamento di ciascuno dei piccoli cristallini primitivi. Anche in questo procedimento si è tentata l'aggiunta di ossido di torio.

La produzione di filamenti tenaci e pieghevoli ha relativamente semplificato la fabbricazione delle lampade, la quale ha potuto raggiungere un grado assai elevato di perfezione. Tutta una serie di ingegnose macchine automatiche è stata inventata per facilitare le numerosissime operazioni elementari nelle quali può decomporsi la fabbricazione, che oggi si fa esclusivamente in grandi serie ; grandi progressi ha fatto altresì la tecnica della produzione economica del vuoto nell'interno dei palloncini, vuoto che generalmente si inizia con ingegnose pompe e si perfeziona (sino a qualche millesimo di mm. di Hg.) con l'impiego di sostanze (*getter*) introdotte preventivamente nel palloncino, e capaci, se riscaldate dal filamento, di formare con i gas residui dei composti solidi ; si fa uso generalmente di sostanze a base di fosforo (Malignani, 1896).

Le attuali lampade di questo tipo funzionano a temperature generalmente comprese fra 2050°C. (per le lampade a filo assai sottile) e 2200° C., alle quali corrisponde una efficienza variabile fra circa 7 e circa 10 lumen per Watt (1), una luminosità dell'ordine dei 600 lambert, ed una durata assoluta media prossima alla 1000 ore.

Intorno al 1910 fu osservato (Skaupy) che l'annerimento interno progressivo delle lampade si poteva attenuare mediante la introduzione nel palloncino di piccolissime quantità di sostanze adatte, generalmente dei cloruri o dei fluoruri; queste sostanze vengono mescolate con quelle a base di fosforo destinate a perfezionare il vuoto (formando così un *getter* più completo) ed introdotte contemporaneamente nel palloncino (si spruzzano sopra i sostegni interni o se ne riveste il filamento). Pur non essendo ben chiaro se le reazioni di queste sostanze col tungsteno sublimato siano di natura chimica o fisica, è un fatto che il deposito sulla parete del palloncino risulta meno opaco, ciò che allunga notevolmente il periodo

(1) Una lampada da 250 *lumen*, per 125 Volt, deve avere il filamento del diametro di circa 3 centesimi di mm. e della lunghezza di circa 550 mm.

(1) Queste cifre mostrano come sia inesatta la denominazione di *monovatt* che talvolta si dà commercialmente a queste lampade, intendendo significare che esse consumano sempre un watt per ogni candela ; difatti, per consumare soltanto 1 watt per ogni candela media sferica, la efficienza dovrebbe essere di circa 12,6 *lumen* per watt.

Digitized by Google

entro il quale la lampada può essere adoperata con vantaggio.

Ma l'esperienza dimostra che il vuoto fatto entro i palloncini, se da un lato contribuisce ad aumentare la efficienza delle lampade in quanto; elimina la perdita di calore per convezione, che altrimenti avverrebbe fra i filamenti ed il gas circostante, facilita però la sublimazione dei filamenti stessi, cioè, ne abbassa la *temperatura economica* di funzionamento. Conservando il vuoto, è difficile superare i 2200°C ; se difatti a 2100°C occorrono circa 400 ore di accensione affinchè un filamento da 5 centesimi di mm. perda per sublimazione l'1 % del suo peso, a 2200°C. bastano circa 80 ore, e ne bastano circa 13 a 2300°C ! E la esperienza ha pure mostrato che difficilmente i filamenti sopportano senza rompersi perdite di peso superiori al 12 %, circa.

S'è tentato perciò in più di un modo di rallentare la sublimazione ; e vi si è finalmente riusciti in modo soddisfacente (Langmuir, 1913) introducendo nel palloncino dei gas chimicamente inerti e di adatte proprietà termiche. I risultati migliori si ottengono con l'azoto e sopratutto con l'argon, i quali (ove siano presenti alla pressione di una atmosfera, a caldo), a temperature dell'ordine di 2300°C., e per filamenti da 5-6 cent. di mm., riducono la velocità di sublimazione a valori rispettivamente circa 30 volte e 80 volte minori. È difficile spiegare quale sia la vera ragione di questa influenza dei gas ; il meccanismo che da taluni è stato immaginato (ammettendo che si tratti di semplice ostacolo che le molecole del gas eserciterebbero, urtandole o deviandole, sopra le molecole di tungsteno che tendono ad uscire dal filamento), oltrechè essere in contrasto con quello che avviene in altri casi ben noti di evaporazione di corpi in presenza di gas estranei, non spiega bene la grande differenza di comportamento fra i vari gas ; la spiegazione appare, in sostanza, un po' ingenua. È verosimile che sul fenomeno influisca molto la diversità fra le proprietà elettriche dello spazio quasi vuoto e quelle dello spazio contenente dei gas a pressione notevole ; diversità che, a parità di altre condizioni, dipende largamente dalla natura del gas.

La presenza del gas fa naturalmente ricomparire la perdita di calore (cioè, di energia) per convezione. Ma siccome la entità di questa perdita dipende dalla forma del corpo assai più che non l'emissione di energia raggiante, si comprende come, dando al filamento una forma molto raccolta, possa, senza danni gravi di altra natura, ridursi la perdita a valori piccoli. Si usa generalmente avvolgere il filo a spirale di piccolo diametro (poche volte il diametro del filo) ed a spire molto serrate, accettando gli inconvenienti che questa soluzione porta con sè, quali la differenza di temperatura e di luminosità fra la parte interna e quella esterna della spiralina, e la minore resistenza alla sublimazione; difficilmente, difatti, i filamenti spiralizzati sopportano senza rompersi perdite di peso per sublimazione superiori al 4 %, (tre volte minori, cioè, che per i filamenti non spiralizzati, nel vuoto).

La temperatura di regime di queste l. non conviene superi i 2250°C. circa per i filamenti sottili (intorno ai 5-6 centesimi di mm.) ma può essere spinta fin verso 2550° C. per filamenti di parecchi decimi di mm. ed anche oltre in l. speciali, nelle quali non sia un inconveniente grave la minore durata. Per conseguenza, in queste l. la efficienza è tanto più elevata quanto maggiore è il diametro del filamento e la potenza luminosa. Nelle grandi unità, da molte diecine di migliaia di lumen, si superano i 20 lumen per Watt ; si scende a 15 lumen per Watt per potenze di circa 30 o 40 lumen per Volt di tensione (per es. lampade da 125 Volt, 4500 lumen, 300 Watt), ed a 10 lumen per Watt per potenze di 5 o 6 lumen per Volt (1) (per es. lampade da 125 Volt, 650 lumen, 60 Watt); lampade a riempimento gassoso per potenze inferiori non vengono generalmente costruite, risultando la loro efficienza eguale od inferiore a quella delle lampade a palloncino vuoto (delle quali sono più costose).

Le lampade a filamento metallico di tungsteno, nel vuoto od in gas chimicamente inerte, sono oggi di gran lunga le più diffuse fra tutte le lampade elettriche sia per il basso costo della luce fornita (Tabella del § 4), sia per la loro adattabilità a qualsiasi uso : se ne fabbricano di tutte le potenze, da quelle con palloncini del diametro di pochi mm., per usi medici e scientifici, a quelle con diametri di 40-30 cm. per oltre 100.000 lumen.

Il consumo attuale di l. ad incandescenza nel nostro Paese è di circa 20 milioni di unità all'anno, e tende a crescere, al pari del consumo mondiale, che ha verosimilmente raggiunto i 600 milioni di unità all'anno (oltre circa 250 milioni di piccole unità per scopi speciali). In taluni Paesi (Stati Uniti) il consumo unitario ha già superato le due unità per abitante e per anno.

È interessante notare che la introduzione delle lampade a filamento metallico ha provocato soltanto nei primi anni una diminuzione nel consumo unitario medio d'energia delle lampade stesse ; chè immediatamente dopo il 1905 si è delineata una richiesta crescente di lampade di maggiore potenza luminosa. Verso il 1900, difatti, la potenza luminosa media delle lampade a filamento di carbone vendute era intorno ai 150 lumen (corrispondente presso a poco alla *lampada da 16 candele*, allora comunissima) ed il consumo medio era prossimo ai 50 Watt; oggi, il consumo medio è ritornato ad essere piuttosto superiore che inferiore a questa cifra, e la potenza luminosa media è prossima ai 600 lumen.

Supposta trascurabile la importanza attuale degli altri sistemi di illuminazione, il consumo italiano di 595 milioni di kWh all'anno per illuminazione, corrisponde, data una potenza unitaria media di 50 Watt, a circa 12 miliardi di lampade-ora all'anno ; e poichè gran parte dei 20 milioni di nuove lampade che ogni anno vengono acquistate serve ai ricambi, se ne deduce che ogni lampada viene adoperata, in media, per circa 600-700 ore.

---

(1) Queste cifre mostrano quanto sia ingiustificata la denominazione commerciale di *mezzo-watt* spesso data a queste lampade ; si avrebbe un consumo soltanto di 0,5 watt per candela media sferica se la efficienza fosse di circa 25,2 lumen per watt.

Digitized by Google

* * *

6. - *I progressi della illuminazione elettrica ad arco.*

È ben noto come, affinchè l'arco si produca (e si mantenga sufficientemente stabile) fra due elettrodi, sia necessario che la differenza di potenziale applicata abbia un valore V il quale dipende principalmente dalla natura degli elettrodi, dal mezzo in cui l'arco si produce, dalla corrente I che lo attraversa e dalla distanza l fra gli elettrodi (*lunghezza* dell'arco). In prima approssimazione, supposta costante I, si può scrivere (Fröhlich):

$$V = A + B\,l$$

essendo A e B due costanti, la prima delle quali dipende principalmente dalla natura degli elettrodi e dal mezzo, mentre la seconda è sensibilmente una funzione della intensità I. Relazioni più complesse (Ayrton) possono seguire meglio le particolarità del fenomeno.

La forma di queste relazioni suggerisce la idea che le costanti del tipo A rappresentino una specie di forza contro-elettromotrice dell'arco, della quale s'è anche cercato di dimostrare la esistenza e di interpretare la natura (fenomeni termoelettrici; fenomeni di polarizzazione, ecc.). L'insieme delle ricerche più attendibili rende però assai probabile che almeno la maggior parte del termine A rappresenti delle vere e proprie resistenze di natura ohmica, aventi sede fra gli elettrodi e l'arco.

Con gli elettrodi di solo carbone usati in principio (ed ottenuti impastando della polvere di carbone, per es., coke, con sostanze agglutinanti, comprimendo la miscela a pressioni assai alte e poi portandola per qualche tempo ad alta temperatura, per es., in forni elettrici a resistenza), e con c.c., la maggior parte della luce è emessa dal cratere anodico, che assume una temperatura altissima (circa 4000°C); l'arco è relativamente poco luminoso e si sposta con facilità, in relazione al consumo ed ai piccoli cambiamenti di forma degli estremi degli elettrodi, dando luogo a fastidiose fluttuazioni del flusso luminoso emesso. Una luce più tranquilla si ottenne con i carboni a *miccia*, i quali presentano un foro assiale riempito di una adatta miscela (generalmente a base di grafite e silicato di sodio) che mantiene l'arco più centrato rispetto i carboni; risultati ancora migliori ed efficienze più elevate si ottennero aggiungendo alla miscela dei sali capaci di dare una emissione intensa nella zona dello spettro visibile. Di questi carboni, che possono venir detti genericamente *a fiamma* (o *ad effetto*), si hanno molte varietà, a seconda della natura dei sali adoperati e quindi del colore dell'arco. Per ottenere luce bianca si adoperano d'ordinario miscele a base di ossido e fluoruro di cerio; aggiungendo ancora dei sali (od ossidi) di calcio, stronzio, ferro, ecc., si ottengono luci tendenti al giallo, al rosso, al violetto, e così via. L'esperienza mostrò che era possibile aumentare ancora la efficienza di questi archi aggiungendo le stesse miscele anche alla pasta di carbone; vinte, difatti, varie difficoltà pratiche, fu intorno al 1900 che vennero messi in commercio i primi tipi di carboni *mineralizzati* (Bremer, Siemens, Blondel, ecc.).

Nei paesi dove i salari sono più elevati, si sono studiati vari artifici allo scopo di ridurre la frequenza dei ricambi dei carboni e le conseguenti spese; i migliori risultati sono stati ottenuti facendo scoccare l'arco entro un ambiente in cui l'aria (e quindi l'ossigeno) si rinnovi con difficoltà (lampade ad *arco chiuso*). Ma se è innegabile la maggior durata dei carboni (si scende persino a consumi prossimi ad 1 mm. per ora, mentre negli archi aperti il consumo è di 1-2 centimetri con carboni a miccia od omogenei, e raggiunge i 4-5 cm. con i carboni speciali mineralizzati), è anche innegabile che la efficienza media è molto minore, sia a causa del diverso regime di funzionamento dell'arco, sia per il deposito progressivo di pulviscolo di carbone sulla parete interna del palloncino di vetro in cui si forma l'arco.

Più complessi sono i fenomeni che l'arco presenta nel caso della c.a., per quanto diventi simmetrico l'aspetto degli elettrodi. L'arco, come è noto, non rimane acceso in modo continuo, ma si spegne ad ogni semiperiodo; e questo dà luogo, fra altro, a forti variazioni periodiche nella luce emessa, le quali, benchè ovviamente rapidissime, riescono fastidiose all'occhio.

Assai interessante sarebbe la storia del perfezionamento progressivo dei meccanismi di regolazione, che tanta influenza hanno sulla tranquillità della luce. Le difficoltà dipendono, più che dal problema da risolvere, in sè, dalla circostanza che questi meccanismi debbono essere semplici, poco costosi e funzionare almeno per dei mesi senza lavori importanti di manutenzione, pur essendo parzialmente esposti alle vicissitudini atmosferiche ed all'influenza, talvolta corrosiva, dei vapori dell'arco. Nei primi tipi, l'avvicinamento dei carboni era semplicemente comandato da un meccanismo di orologeria, la cui velocità veniva fissata in base al consumo medio presunto dei carboni. Ma le inevitabili irregolarità di questo consumo persuasero fin dal 1848 (Archereau) che l'unica soluzione razionale era quella di legare lo spostamento dei carboni alle variazioni che le principali caratteristiche elettriche dell'arco (la corrente e la d.d. pot.) subivano, appunto per effetto del consumo (si ricordi la formula di Fröhlich). Parecchi regolatori (sia per corrente continua che per corrente alternata), difatti, hanno come parte essenziale un solenoide, in serie con l'arco oppure derivato ai suoi estremi, nel cui interno (e spostabile lungo l'asse) si trova un nucleo di ferro al quale è applicata una forza antagonista (un peso, una molla, ecc.); oppure dispositivi equivalenti. La posizione di equilibrio del nucleo dipende evidentemente dalla corrente che attraversa il solenoide, cioè, della corrente che attraversa l'arco, oppure dalla d.d. pot. applicata; qualunque variazione in queste grandezze darà luogo perciò ad uno spostamento del nucleo e potrà essere utilizzata per spostare i carboni nel senso desiderato. I migliori risultati si ottengono con i regolatori *differenziali* (Hefner-Alteneck, 1879) i quali hanno due solenoidi, l'uno in serie e l'altro in derivazione sull'arco, agenti

Digitized by Google

in senso contrario (1) sulla posizione dei carboni; le azioni dei due solenoidi si equilibrano, naturalmente, allorchè corrente e d.d.pot. hanno il valore di regime.

Progressi importanti ha fatto altresì la tecnica dell'impiego degli archi. Fu presto riconosciuta la necessità, affinchè la luce fosse più tranquilla, di mettere in serie con ogni l. ad arco una resistenza *zavorra* costante che attenuasse gli effetti degli inevitabili spostamenti dell'arco fra le punte dei carboni; necessità la quale diminuisce la efficienza effettiva della l. in quanto aumenta, a parità di flusso luminoso prodotto, l'energia consumata. Ma mettendo in serie più lampade, avviene una specie di compensazione, fra le variazioni individuali, che rende minore (o nullo) il valore della resistenza zavorra necessaria; si diffuse perciò molto, quando ne era possibile l'applicazione (come nella illuminazione di strade, piazze, ecc.), il sistema di disporre le lampade in lunghe serie, alimentandole a corrente costante; sistema che per qualche tempo ebbe anche notevole influenza sulla tecnica del macchinario elettrico, provocando lo studio e la costruzione di varî tipi di macchine specialmente atte alla alimentazione di lunghe serie di archi.

Generalizzatisi i sistemi di distribuzione d'energia a c.a. a tensione costante e difficilmente minore di 110 Volt, fu studiata la possibilità, anche per i piccoli impianti, di alimentare in serie parecchie lampade; e si riuscì, profittando della circostanza che con c.a. i coefficienti della relazione di Fröhlich sono minori che con c.c., ad alimentare (con 110 Volt) tre e persino quattro lampade in serie, senza resistenza zavorra (ohmica od induttiva).

Meno felici sono sempre stati i tentativi di costruire lampade ad arco per piccole potenze luminose (al disotto di qualche migliaio di lumen); non perchè sia impossibile mantenere archi anche con correnti relativamente deboli, ma perchè risulta difcile la regolazione, costosa la lampada e relativamente assai bassa la efficienza effettiva.

Fra i tentativi fatti per sostituire gli elettrodi di carbone con elettrodi di altra natura, merita cenno speciale quello di Steinmetz (per c.c.), che ha avuto in passato un certo successo sia per la efficienza abbastanza alta (intorno ai 15 lumen per Watt) raggiunta, sia per il colore relativamente molto bianco della luce emessa. In questa lampada, ad elettrodi generalmente verticali, quello superiore (positivo) è un cilindretto di rame (di durata molto lunga), l'altro è una miscela di ossidi di ferro (*magnetite*, di qui il nome della lampada), di titanio e di cromo compressi entro un tubo di ferro.

Solo da qualche anno, invece, ed in seguito a ricerche senza rapporto diretto con quelle riguardanti le lampade ad elettrodi di carbone, è entrata nell'uso la lampada ad arco fra piccoli elettrodi di tungsteno, nel vuoto. Come forma, essa rassomiglia alle lampade ad incandescenza; ma nell'interno del palloncino si trovano, invece del filamento, due minuscoli elettrodi, di forma sferica o discoide, portati da conduttori filiformi. La formazione dell'arco si ottiene sia ponendo inizialmente gli elettrodi a contatto e poi staccandoli in misura conveniente per mezzo di dispositivi a dilatazione, funzionanti per mezzo del calore stesso dell'arco; sia utilizzando la piccola entità della rigidità dielettrica di alcuni gas (neon, elio, ecc.) che possono essere introdotti nel palloncino, previamente vuotato; sia in altro modo. Si costruiscono già queste lampade per c.c. e per c.a., e per tensioni prossime ad un centinaio di Volt; la loro durata è ancora modesta (qualche centinaio di ore), e modesta è la loro effettiva efficienza attuale (quando le lampade vengono adoperate isolatamente) a causa della necessità di mantenere in serie con l'arco una resistenza zavorra capace di assorbire una d.d.pot. anche maggiore (specie nelle lampade a c.a.) di quella richiesta dall'arco. La caratteristica di queste lampade è quella di fornire una sorgente di luce pressochè *puntiforme*, di altissima luminosità (oltre 5000 lambert), e di uso comodo; esse sono quindi adatte per molti scopi speciali (apparecchi di proiezione, ed affini).

I primi tentativi di utilizzare la elettroluminescenza del vapore di *Hg* risalgono al 1860 (Way); ma risultati pratici non sono stati ottenuti che molto più tardi (Arons, 1892; Cooper-Hewitt, 1900). Nella forma attuale, queste lampade sono costituite da un tubo di vetro (quando si voglia adoperare queste lampade a scopo di illuminazione; ove interessi invece l'emissione nell'ultravioletto, si sostituisce il vetro col quarzo) di forme e dimensioni variabili, entro cui si trovano due elettrodi; il negativo è sempre di *Hg*, il positivo può essere anche di ferro; il tubo contiene solo vapori di *Hg*. L'innesco dell'arco è ottenuto muovendo il tubo in guisa che l'*Hg* faccia corto circuito, per un'istante, fra i due elettrodi; è nel rompersi del filetto di *Hg* che ha origine l'arco, il quale si estende subito a tutto il tubo.

In alcuni tipi recenti (George), il tubo contiene dell'argon e l'accensione è automatica. Artifici adatti hanno permesso di ottenere l'innesco dell'arco ed il successivo regolare funzionamento delle lampade a vapori di Hg anche con le modeste d.d.pot., sia concontinue che alternate, usualmente adoperate nelle distribuzioni di energia. È stato affermato spesso che la efficienza di queste lampade è dell'ordine dei 50 lumen per Watt: maggiore, quindi, di quella delle altre lampade oggi note. Questa affermazione si fonda però sopra un equivoco. Considerando utili soltanto le radiazioni visibili, facendo il confronto con le altre lampade in base alla equivalenza delle illuminazioni ottenute nei riguardi delle proprietà dell'occhio (valori del coefficiente di percettibilità, dell'acuità visuale, ecc.) e tenendo conto dei consumi negli apparecchi accessori delle lampade, la efficienza, per tensioni di 110 Volt è, in realtà, tre o quattro volte minore di quella sopra indicata. Ad impedire la larga diffusione di queste lampade contribuiscono molto la difficoltà di costruirle per le piccole potenze luminose più comunemente richieste ed il colore nettamente verdastro della luce. Malgrado vari tentativi per introdurre queste lampade nella illuminazione industriale (offi-

(1) Le variazioni della distanza dei carboni influiscono sul valore della corrente in senso inverso alla influenza sul valore della d. d. pot.

Digitized by Google

cine, piazzali, ecc.), il loro impiego è oggi limitato prevalentemente (oltre che ad alcuni tipi di illuminazione-réclame) alla cinematografia ed alle industrie affini; dove, cioè, più che ottenere una illuminazione adatta per l'occhio umano, occorre produrre una *illuminazione* (per quanto questa parola diventi impropria) adatta alle lastre fotografiche.

* * *

7. - Lampade ad elettroluminescenza.

I due tipi di lampade ad elettroluminescenza che abbiano acquistato qualche importanza pratica, quelle Moore e quelle a *neon*, derivano direttamente dalle esperienze sulla scarica elettrica nei gas rarefatti. Considerati come lampade, i noti tubi di Geissler, nei quali la sorgente di luce è la cosi detta colonna luminosa positiva della scarica, hanno grandi difetti. Anzitutto, dipendendo largamente le apparenze della scarica della pressione del gas (che deve essere sempre molto piccola) l'effetto assorbente (di cui non sono ancora ben chiare le ragioni intime) delle pareti dei tubi e degli elettrodi fa si che il flusso emesso vada rapidamente diminuendo con l'uso e rende piccola la durata dei tubi; la elevata rigidità dielettrica della maggior parte dei gas rende necessaria l'applicazione di differenze di potenziale assai forti (parecchie migliaia di volt), troppo pericolose per l'uso comune; e poichè di queste differenze di potenziale non è generalmente utilizzata che la parte corrispondente alla colonna gassosa propriamente detta (il resto ha sede, con qualche analogia alle lampade ad arco, nel passaggio fra gli elettrodi ed il gas), se si volesse tentare di diminuire la d.d.pot. necessaria riducendo la lunghezza della colonna gassosa (anche per rendere le lampade più maneggevoli) si andrebbe incontro all'inconveniente della diminuzione di rendimento. Nè deve dimenticarsi la difficoltà di ottenere per questa via una luce di colore praticamente accettabile.

Comunque, fin dal 1904 furono messe in commercio le prime lampade Moore suscettibili, almeno in casi particolari, di uso corrente; e da allora esse non hanno subìto grandi modificazioni. D'ordinario, hanno la forma di tubi molto lunghi (persino 100 metri) di vetro, di quattro o cinque cm. di diametro, che possono essere ripiegati come si vuole (vengono sempre costruiti sul posto, saldando dei tubi più corti), adattandoli alla forma e decorazione dell'ambiente; la elevata d.d.pot. occorrente (parecchie migliaia di Volt), viene ottenuta per mezzo di un adatto trasformatore; gli elettrodi sono generalmente di grafite. Il Moore è riuscito ad eliminare la prima delle sopra accennate difficoltà (la variazione della pressione interna) per mezzo d'un ingegnoso apparecchio, ch'egli chiama *valvola*, collegato al tubo, e fatto in modo che le stesse variazioni nella corrente attraversante il tubo (dovute al lento assorbimento del gas) comandino il rifornimento periodico di gas, in guisa da mantenerne sensibilmente costante la pressione.

Sottratte alle altre (numerose!) cause di distruzione, queste lampade possono realmente durare qualche migliaio di ore. I gas più adoperati sembra siano a base di azoto (luce giallo-rosa) e di anidride carbonica (luce biancastra); le efficenze ottenibili, anche nelle migliori condizioni (con tubi di molte diecine di metri), sono ancora basse, probabilmente dell'ordine di 4 lumen per Watt per l'N e di circa 1,5 lumen per Watt per la CO_2: i tubi producono un flusso luminoso dell'ordine dei 300 lumen per metro di sviluppo. La diffusione attuale di queste lampade è ancora molto limitata, e per ovvie ragioni.

La sostituzione dei gas sopra accennati col neon (Claude), che ha una rigidità dielettrica assai minore, oppure di miscugli a base di neon, elio, ecc., ha condotto, forse con qualche altro sacrificio nella efficienza, alla costruzione di lampade meno ingombranti (sempre a forma di tubi variamente ripiegati), che hanno notevoli applicazioni nelle réclames luminose, alle quali si presta il colore vivace della luce emessa e la sua relativa incostanza, che attrae l'attenzione.

Ma le favorevoli proprietà elettriche e di emissione dei così detti *gas nobili* (elio, neon, argon, ecc.) hanno ancora permesso la costruzione, da qualche anno, d'un altro tipo di lampada ad elettroluminescenza, capace di funzionare con le usuali tensioni di distribuzione. Se si regola la pressione nell'interno del tubo di scarica in guisa che assuma importanza preponderante la così detta luminescenza catodica (anzichè la colonna luminosa positiva) l'esperienza, guidata dalle delicate interpretazioni teoriche che oggi si sanno dare delle particolarità del fenomeno, conferma come la tensione occorrente per l'inizio della scarica possa effettivamente scendere a valori molto bassi ove si impieghino dei gas facilmente jonizzabili e degli elettrodi di natura tale da richiedere quantità relativamente piccole di energia per la emissione degli elettroni destinati a jonizzare il gas. Fra i primi, si prestano bene l'argon, il neon, e l'elio; fra i secondi, il magnesio, l'alluminio, il ferro, il nichel. La necessità di scegliere un gas che abbia una emissione relativamente intensa nello spettro visibile ha condotto alla scelta del neon (oppure di miscele composte di neon e di argon, quando si voglia scendere a tensioni molto basse); gli elettrodi sono di ferro o di nichel, con o senza piccole superficie terminali di magnesio. Le lampade attualmente in uso hanno le dimensioni e l'aspetto esterno delle comuni lampade ad incandescenza; gli elettrodi, sempre a piccola distanza (qualche mm.) fra di loro, hanno forma assai variabile a seconda degli scopi della lampada (spirali coassiali, dischi, calotte, striscie, aste, ecc.). Con c.c. è solo l'elettrodo negativo che appare circondato dalla luminosità rossastra; in c.a., appaiono ovviamente luminosi entrambi gli elettrodi. Anche in queste lampade la efficienza è molto modesta, sia per la piccolezza della d.d.pot. realmente utilizzata, sia per il consumo proprio della resistenza zavorra (generalmente collocata entro lo zoccolo della lampada) necessaria per evitare che la lampada sia troppo sensibile alle variazioni della tensione applicata; difficilmente si supera 1 lumen per Watt nelle lampade per tensioni alternate di 110-220 Volt. La durata di questa lampada può

Digitized by Google

giungere a molte centinaia di ore purchè gli elettrodi abbiano superficie abbastanza grande. Esse hanno attualmente notevoli applicazioni a scopo di réclame, nella tecnica delle segnalazioni, e così via.

* * *

8. - *Le possibilità di progresso, in un avvenire prossimo, della illuminazione elettrica.*

Chi si volga a guardare il passato, riconoscerà che durante molte diecine (o centinaia) di secoli i progressi della tecnica della produzione artificiale della luce sono stati pressochè nulli ; sino ai primi decenni del secolo diciannovesimo, difatti, l'umanità ha continuato ad adoperare esclusivamente lampade a fiamma aventi una efficienza inferiore ad un lumen per grammo di combustibile bruciato ogni ora, cioè (ridotta alla unità di potenza), inferiore a circa un decimo di lumen per Watt (§ 4). Ma sotto la spinta dei bisogni crescenti del vivere civile, e quasi a riguadagnare il tempo perduto, nel volgere di pochi decenni l'uso del petrolio ha portato la efficienza virtuale intorno a 0,3 l. per W. ; l' impiego delle lampade a incandescenza a gas ha triplicato (e, nelle grandi unità, sestuplicata) questa efficienza ; la quale, poi, per merito della illuminazione elettrica, è succesivamente salita a 3 l. p. W. (l. ad inc. a fil. di *C*), poi ad 8 l. p. W. (fil. di tungsteno) e, infine, ad oltre 20 l. p. W. (l. a riemp. gassoso), senza parlare delle lampade ad arco, oggi lasciate in disparte, che raggiungono efficienze ancora maggiori. In un secolo, dunque, la efficienza delle lampade comunemente usate è diventata circa 200 volte maggiore. Non in proporzione è diminuito il costo dell'unità di flusso luminoso prodotto, a causa del crescente valore commerciale unitario delle materie prime o dell'energia impiegata ; ma un progresso c'è stato senza dubbio anche in questo campo (§ 4), ove, ben inteso, si limitino i confronti al vivere civile, anzichè estenderli sino a comprendervi il caso in cui la lampada rudimentale, il ramo resinoso, non costi che la fatica di strapparlo dall'albero più prossimo. Ed un grande progresso si è verificato anche nella larghezza d'impiego delle nuove lampade, le quali consentono il raggiungimento comodo ed igienico di intensità di illuminazione che un secolo addietro sarebbe stato praticamente impossibile ottenere.

Che cosa riserva l'avvenire ?

Veramente, la storia della scienza e della tecnica insegna quanto scarso sia sempre stato il valore delle previsioni che in ogni epoca si sono fatte sulle possibilità di ulteriori progressi. Ma questa constatazione non toglie del tutto l'interesse a considerazioni del genere, specie se limitate ad un avvenire prossimo, anche perchè esse soddisfano innegabilmente ad un nostro desiderio istintivo.

Nessun dubbio, intanto, può esservi oggi sulla possibilità teorica di ulteriori grandissimi progressi, dato che la massima efficienza sperabile è dell'ordine (anche supposto di voler considerare soltanto la produzione di luce bianca) dei 250 lumen per Watt (§ 4) ; e dato, anche, che non si conoscono principi di carattere generale che limitino la trasformabilità in radiazioni visibili di forme adatte di energia (come, ad es., il principio di Carnot limita la trasformabilità del calore in lavoro).

Ora, le lampade ad incandescenza potrebbero dare efficienze maggiori delle attuali soltanto ove si elevasse ancora la temperatura di regime, oppure si sostituisse il tungsteno con un corpo più adatto.

All'elevazione della temperatura si oppongono attualmente varie difficoltà, di cui alcune dipendono dalla lampada in sè (l'eccessiva entità che assumerebbe la sublimazione ; la influenza assai più spiccata che le minime irregolarità locali, geometriche o fisiche, del filamento avrebbero sulla durata della lampada ; l'accentuarsi dei noti fenomeni di cristallizzazione o, comunque, di alterazione nella struttura del filamento), ed altre dalle condizioni in cui le lampade debbono venire impiegate (per es., l'entità relativamente grande delle inevitabili fluttuazioni delle tensioni di distribuzione). Ma queste difficoltà appaiono gradatamente attenuabili. I progressi nella fabbricazione dei filamenti permetteranno di ottenere costantemente quella grandissima uniformità di proprietà che oggi, come rivela l'esperienza diretta, non è sempre raggiunta ; la mescolanza al tungsteno di adatte sostanze (come l'ossido di torio) si è rivelata capace di influire favorevolmente sulla conservazione della struttura del fili ; non c'è nessuna ragione decisiva per ritenere che l'impiego di un gas inerte nell'interno del palloncino sia definitivamente il mezzo più efficace per rallentare la sublimazione od attenuarne gli effetti ; finalmente, sistemi di regolazione della tensione delle reti, capaci di ridurre le attuali fluttuazioni, sono già tecnicamente attuabili quando si voglia : opponendovisi sopratutto il prezzo relativamente basso al quale ancora oggi viene venduta l'energia a scopo d'illuminazione, si tratta soltanto di vedere se il consumatore gradisca l'offerta d'una forma d'energia bensì alquanto più costosa, ma che gli permetterebbe di adoperare lampade di efficienza maggiore. È dunque verosimile che le attuali lampade ad incandescenza possano ancora migliorare in modo molto sensibile ; ma questo miglioramento ha un limite, purtroppo non lontano, e che oggi appare insuperabile, derivante dalla temperatura di fusione del tungsteno, la quale differisce soltanto di alcune centinaia di gradi dalle temperature attuali di funzionamento delle grandi unità a riempimento gassoso.

Si potrà sostituire il tungsteno con altri corpi ?

Qui le congetture sono necessariamente molto più incerte.

Tutte le sostanze note che, pur essendo conduttrici (almeno a caldo), hanno un'altissima temperatura di fusione, sembrano essere state provate; e questo, se non esclude che si possa ritornare a qualcuna di esse (per es., a taluni ossidi) in condizioni nuove, atte ad eliminare inconvenienti che in passato impedivano di approfittare interamente delle loro buone qualità, non lascia per altro grandissime speranze.

Limitate sono altresì le possibilità di trovare sostanze adatte fra i corpi tutt'ora da scoprire. La classificazione di Mendelejeff, trasformata e resa

Digitized by Google

razionale con l'introduzione del *numero d'ordine* degli elementi, di nota interpretazione elettronica, circoscrive difatti singolarmente le possibilità di nuove scoperte al riguardo; le quali si riducono oggi agli elementi di numero d'ordine 85 (peso atomico intermedio fra il polonio e l'emanazione del radio), 87 (id. fra l'emanazione del radio ed il radio), ed a quelli, se esistono, di numero d'ordine superiore all'uranio (92); oltre ai tre elementi individuati per ora solo spettroscopicamente, e quindi di proprietà fisiche incerte (il masurio, 43, il florenzio, 61, ed il renio, 75). Per quello che la classificazione stessa lascia prevedere (analogie con i corpi dei gruppi corrispondenti) non dovrebbe trattarsi di corpi a temperatura di fusione assai alta; quanto, poi, a quelli di numero d'ordine superiore a 92, se esistono, la prevedibile instabilità del loro atomo, alla quale sono dovute le nette manifestazioni radioattive dei corpi di numero d'ordine assai alto (polonio, 84, emanazione, 86, radio, 88, sino all'uranio) lascia dei gravi dubbi intorno alla possibilità di utilizzarli a temperature alte. Ma non è certamente impossibile che qualcuno di questi corpi, o dei loro composti, abbia proprietà favorevoli sotto qualche riguardo, per esempio quello della curva di emissione, e possa essere utilizzato nella tecnica della illuminazione.

Egualmente incerte si presentano le previsioni sull'avvenire delle lampade ad arco. L'unico tentativo parzialmente riuscito per ottenere quelle unità di media potenza luminosa che sono praticamente le più richieste, è quello delle lampade a piccoli elettrodi di tungsteno; ma la necessità di forti resistenze zavorra ne rende ancora troppo bassa la efficienza effettiva perchè si possa pensare ad una estensione del loro uso nei casi nei quali non sia grandemente desiderabile la piccolezza della sorgente di luce. D'altra parte, le ricerche sistematiche fatte sul comportamento dell'arco fra carboni a varî regimi (compreso il funzionamento in ambienti in cui regnino forti pressioni), sulla composizione dei carboni stessi, sulle percentuali più adatte di sostanze estranee, e sulla natura delle sostanze che maggiormente accrescono la luminosità dell'arco, sembrano purtroppo abbastanza complete ed esauriente, almeno dal punto di vista che qui interessa; se però le massime efficienze fin qui raggiunte (dell'ordine dei 35-40 lumen per Watt) potessero essere migliorate o almeno mantenute, e, insieme, venisse molto migliorata la tranquillità della luce emessa e ridotto il costo degli elettrodi e le spese di manutenzione (con l'impiego, ad es., di elettrodi meno consumabili) potrebbe verificarsi un ritorno dell'uso di queste lampade, almeno per le grandi unità. Certo è che il problema del perfezionamento delle lampade ad arco non appare ancora abbandonato dai ricercatori.

Rimangono, infine, le lampade ad elettroluminescenza.

La loro importanza attuale è indubbiamente modesta, e mediocri sono i risultati ottenuti fin qui; però, i fenomeni di luminescenza sono i soli nei quali, a quanto oggi si sa, l'emissione di energia raggiante e la proporzione di radiazioni visibili non siano necessariamente collegate con la temperatura; sono essi, infine, che danno gli esempi più caratteristici, se pure non ancora interamente probativi, di emissioni a bassa temperatura di radiazioni appartenenti esclusivamente alla regione visibile dello spettro. Ma deve pure notarsi che in questi esempi la luminescenza non è di origine elettrica.

In conclusione, sembra probabile che il sistema di illuminazione elettrica oggi più diffuso, quello ad incandescenza, possa essere ancora perfezionato in guisa da condurre in un avvenire prossimo ad efficienze più elevate delle attuali. Non sembra per altro verosimile che per la stessa via si possano ottenere efficienze realmente vicine a quelle massime teoricamente sperabili; nè al riguardo dei sistemi ad elettroluminescenza, i quali consentono le maggiori speranze, si vede ancora come ottenere effettivamente gli ulteriori grandi progressi che non appaiono impossibili. Ma la storia della tecnica insegna che, in tutti i campi, nulla è più sicuro dell'imprevedibile. È possibile che, come già tante volte è avvenuto, il germe di future trasformazioni della tecnica della produzione della luce stia in ricerche puramente teoriche; forse, in quelle delicate e promettenti investigazioni sulla struttura dell'atomo le quali, legando anzitutto l'emissione di energia raggiante non alle condizioni di regime dell'atomo stesso, bensì a mutamenti subitanei nella sua struttura, hanno già da qualche anno rinsaldato la speranza che si possa giungere a padroneggiare la emissione assai meglio di quanto non consenta l'espediente (che in un certo senso si potrebbe dire *cieco*) dell'aumento di temperatura

Sia consentito l'augurio che i nostri nepoti, nell'accingersi a commemorare il secondo centenario della morte del Grande Comasco, possano annoverare nel campo della produzione artificiale della luce ulteriori grandi conquiste, raggiunte mercè un più saggio impiego di quella forma d'energia, così sottile, pieghevole ed obbediente, alla quale è per sempre legato il Suo nome.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. QUIRINO MAJORANA

ISTITUTO FISICO «A. RIGHI» R. UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

LE NUOVE RADIAZIONI

Digitized by Google

Digitized by Google

L'evoluzione della Scienza sperimentale devesi, più di quella inerente a qualsiasi altro ramo dello scibile, alla collaborazione, o più propriamente, all'insieme delle attività di tutti i dotti che, nelle varie epoche o contemporaneamente ed in tutti i paesi, se ne occupano. Poichè principalmente tale evoluzione si fonda sui raziocinii che, alla lor volta, si appoggiano a fatti osservati direttamente nel quadro dei fenomeni naturali o provocati dall'uomo nel suo laboratorio, si comprende come essa sia legata anzitutto alle scoperte di nuove verità naturali. E tali scoperte necessariamente vengono compiute, grado a grado, dalla collettività degli scienziati.

Il vero grande sviluppo della Scienza sperimentale comincia si può dire, con l'epoca di Alessandro Volta, e questi fu preceduto nella storia della fisica, da uomini come Galileo, Newton, Huygens, ed ebbe come quasi contemporanei Young, Fresnel ecc. Dopo l'invenzione della pila, che può meglio chiamarsi *scoperta della corrente elettrica*, le ricerche sperimentali e le conseguenti scoperte in ogni campo della fisica, si sono andate intrecciando in modo veramente impressionante. Ciò, non solo nel ramo dell'elettricità ma, forse per fortunata coincidenza, anche in due altri rami, nei primi tempi ritenuti da quello del tutto distinte, e cioè l'*energetica* (derivante dalla considerazione dei fenomeni termici) e l'ottica.

Autori celebri ormai hanno legato, come è noto, i loro nomi a studi e scoperte in questi tre campi; ed è meraviglioso osservare come la tendenza dello spirito umano, di riunire insieme con qualche relazione od anello di congiunzione, le cognizioni ed i fatti più disparati, abbia ottenuto il più brillante successo in più casi. Tale fatto si è mirabilmente verificato frequentemente in tutto il secolo scorso e, si può dire, continua a verificarsi in questo primo terzo del XX secolo. Così, il principio della conservazione dell'energia, esteso in un primo tempo ai fenomeni meccanici-calorifici, ha successivamente larga applicazione in tutti i capitoli della fisica; i fenomeni magnetici, apparentemente di natura del tutto indipendente da quelli elettrici od elettrodinamici, sono nel 1820 collegati con questi, da Oersted e da Ampère; i fenomeni luminosi, spiegati da Young e da Fresnel come vibrazioni di un ipotetico mezzo, detto etere cosmico, sono assimilati alle perturbazioni elettromagnetiche, in seguito alle scoperte di Faraday, coi lavori di Maxwell, e di Hertz; l'elettroottica, sviluppata man mano, da Faraday a Kerr, a Zeeman, a Majorana, a Stark, a Losurdo, rafforza con fatti interessanti questa parentela; ciò che prima chiamavasi calore raggiante, è assimilato alla luce comune; la natura dei raggi X, scoperti in epoca assai più recente, è poi anch'essa riportata a quella della luce e delle radiazioni elettromagnetiche; le radiazioni delle sostanze radioattive, sono assimilate in parte con gli stessi raggi X, oppure con agenti particolari che già si conoscevano, ma la cui natura non era stata accertata che nell'ultimo trentennio: i raggi catodici o i raggi anodici. E finalmente, negli anni più recenti, gli studi sulla struttura della materia ci hanno fatto comprendere come cosa assai probabile, se non certa, che gli atomi sono costituiti da piccole particelle variamente elettrizzate o forse addirittura, da quell'agente misterioso, che chiamiamo *elettricità*.

Tale immenso progresso scientifico, si è dunque verificato nel secolo scorso, come si è detto; e cioè all'indomani della scoperta della pila, alla quale scoperta ci sia lecito di attribuire gran parte della causa del progresso in parola. In questo senso va inteso, come omaggio a Volta, il discorrere qui dello sviluppo della fisica nel campo delle radiazioni in genere: il cui studio va fatto tenendo presente quello della scienza elettrica, quantunque sovente non appaia a prima vista evidente la relazione tra i due ordini di fenomeni e di teorie.

Si premette, che la particolare forma di energia che si suole indicare col nome di *radiazioni*, ci si può manifestare sotto due aspetti diversi. Prescindendo dalle radiazioni di carattere meccanico, quali sarebbero quelle che equivalgono alle onde acustiche e alle quali si deve la formazione della sensazione sonora; discorreremo delle radiazioni che presentano carattere *ondulatorio*, intendendo che per esse, il mezzo di trasmissione sia l'ipotetico *etere cosmico:* e delle altre di natura *corpuscolare*, che in certo modo ricordano l'idea che aveva Newton, sulla costituzione della luce comune.

Vibrazioni eteree.

Seguendo l'ordine storico, cominciamo a rilevare come al principio del XIX secolo, era ancora dominante l'idea che la luce fosse costituita da particelle speciali, emesse con enorme velocità dalle

Digitized by Google

sorgenti luminose; era cioè ancora in voga la accennata teoria emissiva di Newton, corrispondente a una sorta di bombardamento continuo, o lancio di minutissime *particelle sui generis*. Ma, avversario di tale teoria, che per l'autorità di Newton si era imposta alla maggioranza del mondo colto, fu Tommaso Young, il quale non riusciva ad ammettere che, con la stessa velocità, dovessero venir lanciate quelle particelle, sia dal sole immensamente caldo che dalla pietra focaia. Si venne così alla concezione dell'etere.

L'opera di Young, sovrapponendosi con quella di Fresnel, costituisce la base della moderna teoria ondulatoria della luce; teoria che sviluppata specie per opera del secondo, e completata con lo studio avvenuto molto tempo dopo, dei fenomeni elettrici, può a ragione dirsi una delle più brillanti conquiste dello spirito umano, malgrado le difficoltà nate al riguardo di essa in questo secolo XX e di cui diremo appresso.

Come in ogni nuova formulazione di teorie scientifiche, le idee di Fresnel, non furono completamente accette nei primi tempi. Perchè ciò fosse avvenuto sarebbe occorso che esse avessero reso conto mirabile ed esatto anche dei fenomeni di polarizzazione, come di fatto poi avvenne.

Non è qui nostra intenzione anche di solo riassumere i fondamenti della teoria ondulatoria di Fresnel. Ricorderemo soltanto, come, secondo essa, le vibrazioni luminose sono dovute a scuotimenti trasversali dell'etere. Deriva da ciò, oltre che il concetto di velocità di propagazione (300.000 Km. al 1") quello di lunghezza d'onda, ossia di distanza fra due punti dell'etere consecutivi, nelle stesse condizioni di perturbazione. Discorrendo di lunghezza d'onda la indicheremo in seguito semplicemente con λ, e sin d'ora stabiliremo di misurarla in unità A (cioè Angstrom, o diecimilionesimi di millimetro) o, se del caso in μ (o micron, cioè millesimi di millimetro), od ancora in unità X che sono mille volte più piccole delle unità A. Dal concetto di lunghezza d'onda, e in conseguenza della conoscenza della velocità di propagazione, si risale facilmente alla frequenza, che esprime il numero di vibrazioni della sorgente o di un punto qualsiasi dell'etere, in un minuto secondo.

Restando per ora nel campo delle radiazioni visibili, λ varia da 8000 a 4000 A, andando dall'estremo rosso all'estremo violetto. Corrispondentemente, le frequenze di queste radiazioni limiti sono di $3{,}75 \cdot 10^{14}$, per il rosso e $7{,}50 \cdot 10^{14}$ per il violetto. Le intermedie corrispondono ai differenti colori dello spettro visibile, che può ottenersi con il ben noto mezzo già studiato da Newton del prisma, o mediante i reticoli di diffrazione. Ai tempi di Fresnel, la sua teoria si applicava soltanto alle radiazioni visibili, che si estendono per una sola *ottava*, essendo il rapporto tra le due λ citate, di 1 : 2. Senza dilungarci a discorrere di tutte le svariatissime nozioni che costituiscono i capitoli dell'ottica geometrica o di quella fisica, ricorderemo solo che, ottenere uno spettro dell'insieme di radiazioni emesse da una sorgente, significa distendere su di uno schermo, sulla retina del nostro occhio, o su di una lastra fotografica, le varie λ in ordine crescente o decrescente. E a tale risultato si arriva, come si è detto, per rifrazione o per diffrazione. Si possono inoltre selezionare le varie λ, con processi speciali, fondati sui fenomeni di riflessione o di assorbimento selettivo. Lo studio degli spettri è assai importante, giacchè ci aiuta a scoprire le leggi con cui le varie λ sono emesse dalla sorgente in esame. Può al riguardo accadere che lo spettro sia costituito da una successione regolare e continua di λ diverse, (spettro continuo); e tal caso corrisponde alla eccitazione termica della materia, allo stato solido o liquido. Può inoltre avvenire che si osservino delle discontinuità nella successione delle λ (spettri a righe, a bande, in serie); e ciò corrisponde di solito alla eccitazione ad emettere luce, di corpi aeriformi. Le righe spettrali di questi, hanno permesso negli ultimi decennii di comprendere il modo con cui le ultime particelle materiali (gli atomi) sono costituiti.

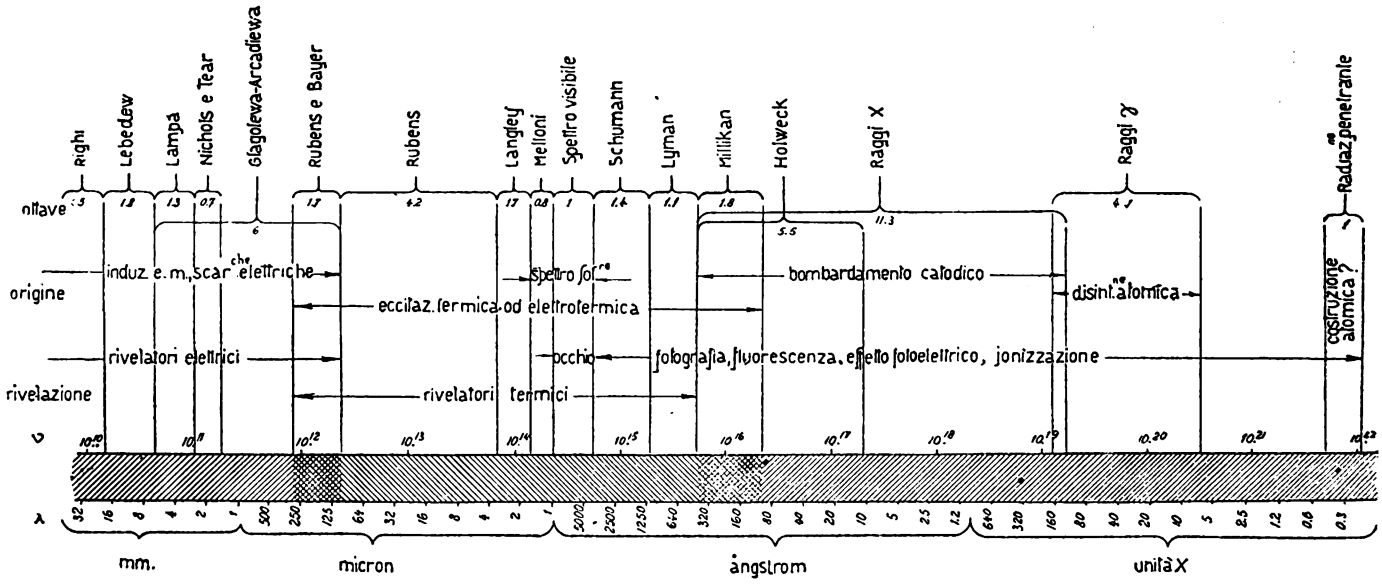


Fig. 1 - Distribuzione in ordine crescente di frequenza, od in ordine decrescente di lunghezza d'onda, delle differenti radiazioni dell'etere. La rappresentazione corrisponde ai logaritmi delle frequenze.

Digitized by Google

Radiazioni ultrarosse.

Quasi parallelamente alla concezione dell'etere di Fresnel, viene emessa l'ipotesi di una particolare sorta di radiazione, apparentemente di natura del tutto differente da quella dei raggi luminosi: il cosidetto *calore raggiante;* così denominato perchè già al principio del secolo scorso erasi constatato come da un corpo caldo, con processo di irradiazione, possa propagarsi il calore agli altri corpi circostanti, posti in libera visuale col primo. Furono i lavori di Rumford, e di Leslie, che permisero la comprensione della natura raggiante di questa azione calorifica, dimostrata non solo dall'ovvia esperienza della possibile sua intercettazione immediata mediante uno schermo; ma dall'altra, secondo cui essa avviene, anche indipendentemente dalla presenza del gas ambiente.

Gli studi sul calore raggiante furono ripresi con grande successo dal Nobili che sostituì al termometro metallico Breguet, il termo-moltiplicatore; e poi, con grande successo da Macedonio Melloni, che è riconosciuto come il più grande fisico italiano succeduto al Volta al principio del XIX secolo. Il Melloni studiò assai più accuratamente di quanto non avessero fatto i suoi predecessori, questa nuova forma di energia raggiante. Trovò come per essa vi fosse un particolare corpo (il salgemma) assai trasparente; indi dimostrò che tale agente è capace di rifrangersi attraverso un prisma di questa sostanza; ottenne poi i fenomeni di polarizzazione. E solo più tardi, da altri, potè anche essere dimostrata la interferenza delle radiazioni in parola. Non occorreva fare alcuna altra ipotesi per spiegare il fenomeno del calore raggiante: logicamente lo stesso etere che serviva da veicolo alla radiazione luminosa costituiva anche il mezzo di trasmissione di tale agente. E si deve ad Ampère, nel 1835, la recisa asserzione di tale concetto. Ciò malgrado, la locuzione di calore raggiante rimase per molto tempo nel nostro linguaggio scientifico, per quanto sin d'allora venisse asserita e sostanzialmente dimostrata, la assoluta identità fra le radiazioni luminose e quelle impropriamente chiamate calorifiche; la sola loro differenza risiede nel valore delle rispettive lunghezze d'onda. Mentre quelle della luce visibile vanno da 4000 *A* per il violetto a 8000 *A* per il rosso, l'ultra rosso o calore raggiante ha λ superiori a questo secondo limite, ossia frequenze più piccole di $3{,}75 \cdot 10^{14}$ vibrazioni per 1". È comunemente dimostrato che le ordinarie sorgenti di luce emettono promiscuamente vibrazioni luminose e vibrazioni oscure. In queste ultime si concentra di solito la massima quantità di energia emessa dalla sorgente, donde le loro spiccate qualità termiche.

Melloni, con i suoi apparecchi, studiava l'effetto integrale di tutte le radiazioni emesse da una sorgente, ed arrivanti sulla pila termo-elettrica. Cosicchè, quando non ricorreva al fenomeno della rifrazione, o alla selezione mediante sostanze variamente trasparenti per le diverse λ, l'effetto in parola era promiscuo. L'uso del prisma gli permise già di osservare appunto la accennata varia distribuzione della azione calorifica nelle differenti località dello spettro, estendentesi anche al di là del colore rosso.

Il concetto di potere emissivo era già stato formulato ai tempi di Melloni. Leslie, Melloni, Tyndall, determinarono in misura relativa questo potere emissivo per vari corpi quando questi avevano temperature diverse; e si riconobbe già allora, che il *tono* delle radiazioni emesse da uno stesso corpo, varia precisamente con la temperatura. Ciò equivale a dire, che varia la intensità relativa delle diverse λ col variare della temperatura stessa.

Per parlare delle leggi che governano il fenomeno della emissione integrale di un corpo riscaldato, diremo che mentre Newton ammetteva che l'energia emessa da una sorgente fosse proporzionale alla differenza fra le temperature della sorgente e quella dei corpi circostanti, presto si riconobbe, dopo i lavori di Melloni, che tale legge non è affatto esatta; specie se il detto squilibrio di temperatura è notevole. Si arriva così alla classica legge di Stefan, che afferma la proporzionalità di questo potere emissivo con la quarta potenza delle temperature. Ma questo risultato, che si appoggia su considerazioni di carattere teorico, è rigorosamente esatto soltanto per un corpo che gode di una particolare proprietà; esso è stato chiamato corpo *nero*. Per definir questo, occorre rilevare come insieme al potere emissivo, si debba considerare il potere assorbente: una grandezza che deriva dall'attitudine da parte del corpo di assorbire le radiazioni che su di esso arrivano dall'esterno. Per il corpo nero, che è un corpo ideale, non esattamente realizzabile in pratica, il potere assorbente deve essere il massimo possibile, e ciò per tutte le radiazioni e a qualsiasi temperatura. Il nerofumo si avvicina per le sue proprietà al corpo nero.

Riassumere in questo articolo le varie considerazioni teoriche e sperimentali, che dai tempi di Melloni si sono man mano andate accumulando sul problema, non è possibile. Diremo soltanto che accurati studii eseguiti da moltissimi fisici, hanno permesso di vagliare attentamente i rapporti esistenti fra le due proprietà dei corpi, di emettere e di assorbire energia sotto forma di radiazioni, e in tale studio sono stati sempre applicati i principii rigorosi dalla termodinamica. Nel processo di emissione e di assorbimento, ha effettivamente luogo una continua trasformazione di energia. Questa passa dallo stato di energia termica nel corpo emittente, a quella di energia vibratoria nel mezzo etereo circostante; viaggia con la velocità della luce di 300.000 Km. al secondo, ed arriva sugli altri corpi esterni. Lì avvengono fenomeni di riflessione o diffusione; di passaggio attraverso gli stessi corpi o di rifrazione (corrispondentemente alle condizioni superficiali ed alla varia trasparenza dei corpi); di assorbimento. Questi tre fatti si svolgono in misura assai diversa da caso a caso; l'energia che compete al loro insieme, è naturalmente eguale a quella trasmessa.

Il problema dunque dello studio della emissione o dell'assorbimento di energia raggiante da parte dei vari corpi, è straordinariamente complesso; si hanno infatti come variabili di tale fenomeno, oltre qual cosa che dipende dalla natura del corpo, la tempera-

Digitized by Google

tura e le singole lunghezze d'onda. Con la legge di Stefan si comincia a prescindere dalla natura del corpo emettente, riducendolo al così detto corpo nero; ma enunciato il fatto che l'energia integrale da esso emessa è proporzionale alla quarta potenza della temperatura, rimane da vedere come questa energia sia distribuita fra le varie lunghezze d'onda. A ciò si arriva più tardi, mediante una relazione scoperta dal Planck al principio del secolo attuale, che lega insieme potere emissivo, lunghezza d'onda e temperatura assoluta del corpo nero. Tale relazione si interpreta ammettendo che ad una data temperatura questo corpo emette energia con intensità variabile per le varie λ; piccola per le brevissime λ, più grande man mano per λ crescente, massima per un certo valore di λ, λ_m, e decrescente di nuovo per le maggiori λ. La formula di Planck, tradotta in diagramma grafico, riferito a due assi coordinati su cui si riportano i poteri emissivi e le varie λ, ha un massimo per λ_m: va a zero per le λ = zero, ed è assintotica per le λ crescenti verso l'infinito (vibrazioni ultra rosse, od elettriche). La formula di Planck fa inoltre vedere come questa curva si vada modificando al crescere della temperatura, pur conservando la sua forma caratteristica, e il suo massimo valore si sposti verso le λ decrescenti; tale fatto è d'accordo con l'osservazione comunissima che un corpo riscaldato sempre più vivacemente, emette con facilità crescente le λ più brevi: al disotto di circa 500 gradi centigradi, i corpi non emettono luce; al di là cominciano a dare il rosso, poi le altre λ visibili, sino a dare completamente la luce bianca; poi anche le radiazioni a λ brevissima (ultravioletto, come avviene per l'arco voltaico o per le scintille elettriche). Ma è da tener presente che, in valore assoluto, la energia emessa per ciascuna λ, anche lunga, va crescendo con la temperatura. Questo fatto è d'accordo con una legge precedentemente enunciata dal Wien, per il corpo nero, che cioè la temperatura del corpo nero varia in ragione inversa della lunghezza d'onda alla quale corrisponde la massima emissione.

Tutto quanto abbiamo detto si riferisce al corpo nero. Viene allora fatto di domandare che cosa succeda per gli altri corpi, che sono per altro quelli naturali. Per essi, la legge della emissione è molto più complessa, nè in generale è esprimibile matematicamente con rigore. Ma un importante principio o legge governa il fenomeno in parola ed esso stabilisce per un corpo qualsiasi la esatta proporzionalità tra il potere emissivo ed il potere assorbente, per quanto si riferisce ad una determinata temperatura e ad una particolare lunghezza d'onda. Con ciò si ha la esatta enunciazione del principio di Kirchhoff.

I lavori di Planck su questo argomento, sono particolarmente interessanti, giacchè essi hanno dato origine alla importante teoria dei *quanti*, oggi assai in voga, e che interpreta molti fenomeni fisici; quantunque il suo contenuto sostanziale non sia stato sinora completamente afferrato e, se si vuole, non sia d'accordo con taluni concetti intuitivi fisici, che dominavano indiscussi prima del 1900. La teoria dei *quanti* introduce l'ipotesi nuova e non concorde nè con la teoria ondulatoria eterea nè con l'elettrodinamica, che gli scambi di energia raggiante tra materia ed etere, si facciano in modo discontinuo; cioè secondo multipli di una quantità elementare energetica $\varepsilon = h\nu$, in cui h è il così detto *quanto di azione* di Planck e ν la frequenza della radiazione: nella formula di Planck figura precisamente questa grandezza ε.

Si deve poi ad Einstein, la estensione del principio di Planck agli atomi dei corpi solidi, per determinarne il calore specifico; ed all'effetto fotoelettrico, di cui dovremo poi occuparci.

Valga questo accenno sommario a far rilevare come dai semplici fenomeni delle irradiazioni dei corpi caldi, si sia arrivati alle cognizioni e alle teorie, che costituiscono oggi uno dei più complessi capitoli della fisica moderna.

Ritornando alla considerazione di fatti puramente sperimentali, esaminiamo ora quali progressi si siano realizzati dopo Melloni nello studio della regione ultra rossa dello spettro.

Diremo anzitutto che mentre Melloni disponeva come mezzo di osservazione della sola pila termoelettrica, i suoi successori si servirono di altri mezzi in certi casi assai più sensibili.

Il bolometro di Langley (1881) è fondato sulla variazione di resistenza di sottili fili metallici anneriti, che si manifesta quando essi sono colpiti da radiazioni termiche. La loro resistenza elettrica subisce delle variazioni che sono poste in evidenza dal ponte di Wheatstone. Successivamente anche un altro congegno, il radiometro di Crookes già inventato nel 1874 e il radio-micrometro di Boys, permisero osservazioni con sensibilità paragonabile a quella ottenuta col bolometro. La sensibilità di questi metodi può raggiungere l'ordine del milionesimo di grado centigrado.

Con questi mezzi alla mano, si deve al Langley l'inizio di un'era nuova nella storia dello spettro infrarosso. Così egli può studiare le radiazioni disperse dal flint sino a $\lambda = 2{,}7\ \mu$ (27000 A), e servendosi di salgemma, che come già aveva osservato Melloni è assai trasparente per i raggi ultrarossi, può arrivare a 5,3 μ (53000 A). Ma un gran passo in questo campo è poi ottenuto da Rubens, il quale ha una idea originale. Gli sperimentatori precedenti, per separare le varie lunghezze d'onda, si erano serviti di prismi od anche di reticoli di diffrazione. Ora, stava precisamente in ciò la causa per cui essi non si erano potuti spingere al di là di un certo limite nell'esame delle λ crescenti: al di là di un certo valore, le λ vengono assorbite, adoperando i detti congegni. Rubens ricorre allora al metodo dei così detti *raggi restanti*. Egli è preceduto in ciò da un lavoro di Lord Rajleigh, sulla riflessione dei corpi fortemente opachi; secondo il quale un corpo assorbente riflette intensamente le radiazioni che precisamente sono più assorbite. Da ciò comprende il Rubens, che si sarebbe avuto un'abbondante selezione di alcuni raggi mescolati a tanti altri, in vicinanza della così detta banda di assorbimento. In altri termini le lunghezze d'onda corrispondenti a tali bande di assorbimento, più o meno strette, col-

Digitized by Google

pendo le sostanze, non vi penetrano a grande profondità, e sono in gran parte riflesse come avviene appunto per i metalli con la luce ordinaria. Ha luogo cioè precisamente per determinate λ, il fenomeno della riflessione metallica. E infatti il Rubens, servendosi di un becco Auer, come sorgente di radiazioni, riesce a selezionare da esse, mediante un piccolo numero di riflessioni (sino a cinque) su fluorina o su quarzo, dei raggi ultrarossi di grande lunghezza d'onda. Il metodo di controllo della lunghezza d'onda, è basato su l'uso di uno spettroscopio catottrico, costituito da reticoli di fili d'argento del diametro di 0,18 millimetri, tesi parallelamente. Rubens arriva così in un primo tempo ad avere raggi ultrarossi restanti della lunghezza di 70 μ (70000 *A*). Tali radiazioni sono fortemente assorbite dal vapor d'acqua, ed è questa la ragione per cui esse non si trovano nello spettro solare, che ne è privato a causa della nostra atmosfera. Più tardi, lo stesso Rubens aumentando la sensibilità dei suoi congegni e servendosi di filtri adatti, in collaborazione con Baeyer, arriva a selezionare delle onde persino di 314 micron (0,3 millimetri circa). L'artificio principale per ottenere questo risultato è quello di adoperare una lampada di quarzo a vapore di mercurio, un interferometro a lamina di quarzo e un filtro di cartone di 0,4 mm.

Gli indicati metodi per studiare le radiazioni ultra rosse, si fondano sulla osservazione di un effetto calorifico messo in evidenza sia dalla pinza termoelettrica, sia dal bolometro, che dal radiometro. Ma vi sono ancora altre azioni che possono venire sfruttate, a seconda dei casi, per porre in evidenza tali raggi. È una vecchia osservazione del Vogel (1873), quella secondo cui la gelatina sensibilizzata della lastra fotografica, che notoriamente è insensibile alla luce rossa, diviene sensibile quando ad essa è aggiunta qualche sostanza assorbente delle radiazioni stesse. Così in seguito si prova che anche delle λ di valore più che doppio delle rosse, possono impressionare le lastre fotografiche.

Inoltre il fenomeno detto di *fosforescenza*, offre anche un mezzo di studio delle radiazioni ultrarosse. Diremo anzitutto che esso consiste nel fatto che, sotto l'azione delle λ più corte (e precisamente delle così dette λ ultraviolette) alcuni corpi, come solfuri metallici, restano luminosi anche dopo cessata l'azione di tali λ. Questo fenomeno va degradando più o meno rapidamente col tempo ; ma si arresta invece bruscamente quando la sostanza fosforescente è colpita da raggi ultrarossi od in generale a grande λ. In ciò si ha un mezzo elegante e rapido, se non eccessivamente sensibile, per mettere in evidenza certe righe spettroscopiche di emissione o di assorbimento della regione ultrarossa.

Collegamento delle radiazioni ultrarosse con le elettromagnetiche.

Ma per terminare di discorrere delle radiazioni ultrarosse, ci rimane ad accennare ai passi compiuti in tale campo, negli ultimissimi anni. Secondo le esperienze di Rubens, il limite raggiunto per le massime λ ultrarosse è di micron 314. Ora, è noto che le λ elettromagnetiche (che consistono anch'esse in scuotimenti dell'etere) possono variare da un valore teoricamente infinito (e che praticamente può essere di più chilometri), sino a qualche centimetro, come dimostrò Righi o solo 6 millimetri come trovò Lebedew, o ancora meno come trovarono Lampa e Mobius (circa 3 mm.). Quest'ultimo limite è stato raggiunto nei laboratori eseguendo ricerche sull'*ottica delle oscillazioni elettriche*, e rimane fissato dalle dimensioni dei così detti oscillatori ; che, se in radiotelegrafia sono le antenne, nei laboratori possono essere piccolissimi conduttori metallici, fra cui scoccano scintille elettriche. Si comprende ora, come non vi possa essere teoricamente alcun limite nello scendere a valori brevissimi delle λ, anche con le onde eteree ottenute con metodi elettrici. Ma praticamente questo limite si trova ; ed è dato dal fatto che col diminuire delle dimensioni dell'oscillatore non si ha modo di immagazzinare in esso sufficiente energia perchè i congegni anche più sensibili la rivelino. Si pensi infatti al modo di funzionare di un oscillatore elettrico che possiamo chiamare *artificiale* (quali quelli usati in radiotelegrafia) e che emette intermittentemente energia, a causa delle scintille rade che fra esso scoccano. L'*oscillatore naturale* che è costituito dalla materia riscaldata, che viene così ad eccitare con mezzo termico l'etere circostante, funziona in modo persistente ed utilizza perciò quantità di energia assai maggiori. Ciò, anche in vista del fatto che un grandissimo numero di oscillatori elementari, continuamente entrano in funzione. La differenza con cui tale energia è emessa nel tempo, unita forse a più intime differenze di carattere quantitativo, giustifica poi perchè si usino di solito nel primo caso i rivelatori di carattere elettrico (studiati in radiotelegrafia) e nel secondo quelli di carattere termico, di cui abbiamo discorso. Nè vale a menomare la differenza tra i due generi di fenomeni, il fatto che il fisico sia riuscito ad ottenere oscillatori artificiali persistenti, mediante le valvole termojoniche ; poichè il limite inferiore delle λ così raggiungibile, è dell'ordine del metro.

Da quanto precede risulta impostato il problema di ricoprire con osservazioni dirette l'intervallo intercedente tra il limite massimo delle λ ultrarosse fissato da Rubens in 314 micron, e quello minimo delle elettromagnetiche di circa 3 mm.

Più fisici si sono dunque dati a ricerche sperimentali tendenti a risolvere tale problema.

Un primo risultato interessante ce lo forniscono due americani, Nichols e Tear, i quali adoperano (1923) un piccolissimo oscillatore costituito da due minuscoli cilindretti di tungsteno (0,2 mm. di lunghezza ed altrettanto di diametro) fra essi scocca una serie ininterrotta di scintille, resa possibile perchè tra le estremità dei cilindri vi è solo un intervallo di un centesimo di millimetro spazzato continuamente da una vigorosa corrente di olio. Si realizza così il più piccolo oscillatore artificiale distinto, finora conosciuto. Per rivelare le brevi onde da esso emesse, gli autori si servono di risuonatori anche essi piccolissimi, sui quali si osserva l'effetto calorifico, prodotto dal fenomeno della risonanza elettrica. È interessante al riguardo, pensare come tale metodo

Digitized by Google

abbia in sè qualcosa che ricorda i rivelatori di onde elettriche e quelli di onde luminose-calorifiche. La parola risuonatore si riconnette al dispositivo classico di Hertz, di un largo cerchio metallico aperto, tra le cui estremità si osservano minute scintille, o agli specchi di Righi. L'osservarne l'effetto calorifico ha relazione con tutti gli svariati metodi di rivelazione delle onde luminose colla pinza termoelettrica (o in generale con i calorifici). Certamente l'effetto calorifico non manca tanto nei fenomeni di risuonanza provocati dalle lunghissime onde radiotelegrafiche, quanto dalle cortissime onde luminose. Ma mentre per le prime, le quantità di calore prodotte nella massa materiale dei conduttori impiegati, sono relativamente piccole (e quindi impossibili a constatarsi, almeno in certi casi); nei piccolissimi risuonatori elementari, costituiti dalle particelle materiali che assorbono le radiazioni, il rapporto tra quantità di calore e massa materiale è grande; e diventa relativamente facile la detta constatazione dal punto di vista sperimentale. I risuonatori di Nichols e Tear sono costituiti da sottilissimi fili di platino del diametro di un micron, oppure da esilissimi strati metallici, deposti su lastre di mica mediante precipitazione catodica. Per osservare l'accrescimento di temperatura di tali delicatissimi congegni, questi sono sospesi al giogo di un radiometro di Crookes, all'uopo studiato, ed avente una rarefazione corrispondente a 0,05 mm. di mercurio, di pressione.

Le onde elettromagnetiche, prodotte nel dispositivo più sopra descritto, danno luogo a sensibili deviazioni di tale rivelatore; la loro lunghezza è preventivamente controllata mediante un dispositivo interferenziale. Così, gli autori citati arrivano a produrre e rivelare delle onde di mm. 1,8; compiendo un ulteriore passo (forse più notevole per la sua ingegnosità che per la sua entità), verso il collegamento delle onde elettromagnetiche con le ultrarosse.

Dopo questi risultati rimane ancora da colmare l'intervallo compreso fra le λ di mm. 1,8 e quelle di mm. 0,314, osservate da Rubens. Sembrava difficile, sino ad un paio di anni or sono che ciò fosse possibile; quando compare un lavoro della russa Glagolewa-Arkadiewa, che annunzia come definitivamente risoluto questo problema. In esso si vede tradotta in atto un'idea semplice ed assai ingegnosa, come ora si dirà. Se si fanno scoccare delle scintille elettriche fra numerosissime e piccolissime particelle metalliche, come sono quelle di una polvere o limatura omogenea, ciascuna particella, o se si vuole ciascuna coppia di particelle fra cui una scintilla elementare viene a formarsi, è sede di oscillazioni elettriche. Fondandosi su questo concetto il citato autore ha costruito un dispositivo che chiama *irradiatore di massa*. Esso è formato da una sorta di emulsione ottenuta con le dette particelle metalliche e dell'olio; questa emulsione è sottoposta alle scariche di un rocchetto di induzione, e diviene così sede di un grandissimo numero di minute scintilline. Si comprende che, a motivo del causale orientamento delle particelle fra cui queste si formano, debba dal sistema sprigionarsi un insieme di onde non polarizzate, cioè il cui vettore elettrico risultante è comunque orientato nei vari istanti. Ciò costituisce una differenza caratteristica tra gli oscillatori sinora conosciuti ed il nuovo; quelli, per la unicità della sede delle scintille, danno onde quasi esattamente polarizzate.

Per osservare le onde emesse da questo sistema, l'autore si serve del noto metodo interferenziale; consistente nella riflessione delle onde su due specchi paralleli, con piani non esattamente coincidenti, e spostati per un quarto della lunghezza d'onda da misurare. Le onde sono poi proiettate su un sensibile congegno termoelettrico. Secondo la Glagolewa-Arkadiewa, il λ delle sue onde risulta variabile a seconda dei casi, fra mm. 50 e mm. 0,1, ossia cento micron. Per cui, con questa esperienza non solo sarebbe stato raggiunto il limite inferiore delle onde ultrarosse (314 micron), ma esso sarebbe stato ampiamente sorpassato.

Nessuna lacuna esiste più dunque fra la luce comune e le onde elettriche. I metodi di generazione di queste due specie di radiazioni sono per noi essenzialmente diversi; ma occorre variarli e graduarli a seconda della λ che si vuole ottenere. Mentre per le onde luminose e le ultrarosse, il vecchio modo di eccitazione calorifica si incarica della loro produzione, senza che noi ci preoccupiamo di fabbricare o predisporre in modo particolare i vibratori singoli ed elementari (da poichè essi ci vengono forniti dalla natura per la costituzione propria della materia); per le onde elettromagnetiche si è avuto di bisogno di scoprire e comprendere, attraverso il periodo che si inizia con Hertz (80 anni dopo Volta) e che arriva a oggi, la funzione del moto delle masse elettriche attraverso la materia, e della conseguente eccitazione del circostante ipotetico mezzo etereo. Si è potuto così arrivare a generare una certa zona di onde, compresa fra mm. 0,314 e 0,100, sia col metodo elettrico che con quello termico, ed osservarne gli effetti con sensibili congegni che oggi non sapremmo più definire se elettrici o termici; in quanto che essi indifferentemente possono chiamarsi nell'una o nell'altra maniera. La ben nota tendenza dell'uomo a unificare più che gli sia possibile le proprie cognizioni, è stata ancora una volta soddisfatta.

Radiazioni ultraviolette.

Passiamo ora ad esaminare un altro campo di radiazioni che sono trasmesse dall'etere; quello cioè che si trova al di là del violetto, e costituisce le così dette radiazioni ultraviolette. Già Young aveva fatto osservare che certe radiazioni impressionanti i sali di argento, e trovantisi nello spettro, subito dopo il violetto, hanno, rispetto a questa tinta una lunghezza d'onda inferiore. Poi tali radiazioni furono studiate da Becquerel, Draper, Stokes, Helmholtz, mediate la daguerrotipia, oppure con la fluorescenza. Con questo ultimo metodo, che consente, se non una estrema sensibilità, una immediata osservazione dei fenomeni, si è potuto constatare che certi corpi sottoposti all'azione dello spettro solare, anche al di là del violetto, assumono tinte caratteristiche, provenienti da luce propria e diversa da quella incidente. Da questo momento si estendono rapidamente

Digitized by Google

gli studi spettroscopici al di là del violetto, scoprendo in tale campo una zona, prima del 1870, inesplorata.

Si arriva così a prendere in esame accuratamente fra gli altri lo spettro solare, constatandosi che le lunghezze d'onda più brevi di questo spettro si aggirano intorno ai 3000 *A*; si trova in seguito che le sorgenti di radiazioni terrestri hanno un'estensione di spettro che è talvolta superiore a quella dello spettro solare; e ciò fa comprendere specie per i lavori di Cornu, che la ragione di tale differenza deve ricercarsi nell'assorbimento da parte dell'atmosfera terrestre. Non vi è infatti motivo perchè un arco voltaico, la cui temperatura non è comunemente superiore a quella del sole, debba emettere radiazioni più estese nel campo dell'ultra-violetto che non il sole. Anche nelle esperienze di laboratorio, i brevi tratti di atmosfera ambiente possono occasionare assorbimento selettivo, venendosi così a diminuire l'estensione dello spettro ultravioletto, delle sorgenti artificiali.

Accurate esperienze eseguite dallo Schumann nel vuoto, permettono poi di scoprire un'ulteriore regione che viene chiamata regione di Schumann.

Oltre ad adottare il criterio informatore di lavorare nel vuoto, lo Schumann si preoccupa, nelle sue ricerche, di rendere trasparente il più possibile il prisma destinato alla decomposizione delle complesse radiazioni da studiare. Egli così nota come al quarzo, che si sapeva già essere assai trasparente ai raggi ultravioletti, sia preferibile la fluorina; comprende poi come le radiazioni di più piccola λ vengano anche per buona parte assorbite dalla gelatina destinata a sostenere i sali d'argento delle lastre fotografiche adoperate come mezzo di rivelazione. Egli è così indotto a fabbricare delle emulsioni a bassissimo tenore di gelatina. Con tali artifici, riesce ad accrescere la sensibilità dei suoi metodi, e arriva a costruire uno spettroscopio racchiuso in un ambiente privo di aria, le cui parti diottriche sono fabbricate esclusivamente in fluorina: lenti e prismi. Così, egli può studiare la luce emessa da un tubo di scarica ad idrogeno, molto al di là dei limiti precedentemente raggiunti, dagli altri sperimentatori, e con queste ed altre esperienze spingere il limite dell'osservazione delle λ brevi a 1200 *A*.

L'opera di Schumann termina verso la fine del secolo scorso; egli aveva aperto così un campo di ricerche che è poi felicemente e più minutamente sfruttato da altri.

Occorre anzitutto rilevare, che mentre l'uso di uno spettroscopio a prisma, come era adoperato da Schumann, consente di ricercare nuove radiazioni o righe spettrali, definendone la loro posizione in maniera reciprocamente relativa; esso non permette una precisa valutazione delle particolari lunghezze d'onda (giacchè non è conosciuto il potere dispersivo esatto della fluorina in quella zona). Si tenta allora da parecchi, di ricorrere ad un altro principio, per ottenere la dispersione delle radiazioni u. v., ed esaminarne la costituzione; e cioè si usano reticoli di diffrazione. Secondo tale idea, al fenomeno della rifrazione del prisma, viene sostituito quello della riflessione sulla superficie del reticolo. Per potere tradurre in atto tale concetto, occorre prima rendersi conto del modo con cui i vari corpi riflettono la luce u. v.; chè non è senz'altro da credere, che un reticolo costruito con metallo molto riflettente per la luce ordinaria, come l'argento, sia anche il più indicato per la luce u. v. Infatti secondo le ricerche di Rubens e Hagen risulta che, mentre l'argento riflette perfettamente la luce ordinaria, presenta un minimo marcatissimo (riflette solo il 4 %) per 3160 *A*; poi il potere riflettente aumenta sino a 2510 *A*; e infine decresce di nuovo. Il platino, il nichel, il ferro, pur assorbendo notevolmente le radiazioni u. v., ne riflettono circa il 40%, per la regione di 2500 *A*. Per la costruzione dei reticoli, si sceglie di solito, una lega che non differisce molto da quella usata da Rowland (metallo *speculum*), e che sembra avere un potere riflettente notevole, anche per i raggi u. v.

Seguendo criterii derivanti da quanto si è detto, un americano, il Lyman, compatriotta del celebre Rowland, al quale si deve la costruzione dei reticoli più fini, riprende le ricerche di Schumann. Egli abolisce l'uso della fluorina, che al di là della regione di Schumann comincia a diventare opaca, e si serve, al posto del prisma, di reticoli di diffrazione simili a quelli di Rowland, con 591 tratti per mm. Le esperienze di Lyman si svolgono o in ambiente di idrogeno o anche nel vuoto, come aveva fatto Schumann. Descrivere le particolarità di un simile spettroscopio racchiuso in un ambiente privo di atmosfera, più complesso di quello realizzato dallo Schumann, esorbiterebbe dai limiti di questo articolo; basta rilevare che tutte le manovre, dalla messa in fuoco, all'aggiustaggio della lastra fotografica, all'esposizione di questa, ecc., vengono eseguite o comandate dal di fuori della cassa in cui è stata estratta l'aria, e che contiene il dispositivo.

Con questo apparecchio Lyman esegue anzitutto il controllo del potere dispersivo della fluorina, stabilendo così quale sia il grado di precisione delle misure precedentemente fatte dallo Schumann; spinge in seguito l'esame delle radiazioni sino a $\lambda = 500$ *A*.

Ma non è stato questo il limite più basso raggiunto in fatto di lunghezza d'onda. Coi mezzi disponibili in uno di quei laboratori americani per i quali, come fa notare Fabry, la nostra ammirazione si mescola a un po' di invidia, Millikan ha potuto eccitare violentemente la materia (metalli varii o carbone) adoperando elettrodi di diversa natura, fino a farle emettere radiazioni corrispondenti a lunghezze d'onda di così piccolo valore, come mai prima era avvenuto. L'artificio adottato per ciò, è quello di servirsi di potentissime scariche elettriche nel vuoto e con tensioni di circa un milione di volt. In sostanza, il metodo di Millikan non differisce, per quanto concerne i concetti su cui è basato, da quello di Lyman, a parte la maggiore grandiosità dei mezzi adottati. Così egli arriva a trovare righe spettrali di emissione dell'ossigeno o dell'alluminio, con valori di λ di 136 *A* soltanto. Per cui è questo il più basso dei valori di λ raggiunto sin'ora, con l'eccitazione termica od elettrica della materia.

Digitized by Google

La luce u. v. è assorbita variamente dai diversi mezzi. Sotto spessori sottili, l'assorbimento dell'aria non ha grande importanza, fin tanto che si resti nella regione dell'ultravioletto solare. Spingendosi più in là, l'assorbimento diventa molto notevole, tanto, come si è detto, da costringere gli esperimentatori a porre i loro apparecchi nel vuoto. Fra gli altri gas, il vapor d'acqua e l'anidride carbonica, sono praticamente trasparenti; per cui, è da ritenere che l'ossigeno sia piuttosto opaco, il che è confermato da esperienze dirette. Oltre che l'ossigeno, l'ozono assorbe notevolmente le radiazioni u. v. Si pensa da taluno che la mancanza dell'estremo u. v. nello spettro solare, sia dovuta alla presenza dell'ozono negli alti strati dell'atmosfera. L'idrogeno, se puro, è molto trasparente, in quasi tutte le λ dell'u. v. Quanto alla trasparenza dei corpi non gassosi, essa è in generale molto limitata. Si ricorda solo che il quarzo, la fluorina e l'acqua sono abbastanza trasparenti, per le prime regioni della zona in parola.

Le radiazioni u. v., come sono intese comunemente, si estendono dunque dal valore di circa 4000 A a 136 A ; tale intervallo corrisponde a cinque ottave circa, cioè cinque volte più esteso dell'intervallo delle radiazioni luminose. Di tutte queste radiazioni u. v. appena una mezza ottava circa è contenuta nello spettro solare come noi possiamo osservarlo ; il resto è stato trovato in sorgenti da laboratorio, usando gli svariati accorgimenti di cui si è detto.

Circa le altre proprietà delle radiazioni u. v., esse differiscono in generale assai da quelle della luce visibile e dell'ultrarosso. Benchè esse siano una forma di energia che, se assorbita deve trasformarsi in calore, e quantunque numerosi sperimentatori si siano serviti nelle loro ricerche di tale effetto calorifico, non è questo il metodo più consigliabile per procedere allo studio delle radiazioni in parola, giacchè danno sensibilità maggiore i mezzi fondati su altre proprietà. D'altro canto è da riflettere che i risultati che si ottengono con l'uso della pila termoelettrica, sono più facilmente interpretabili dal punto di vista energetico.

Oltre gli effetti calorifici, per la loro natura modesti, le radiazioni u. v. godono di tre altre proprietà distinte : fluorescenza o fosforescenza, azioni chimiche, azioni elettriche.

I fenomeni di fluorescenza sono particolarmente notevoli quando tali radiazioni colpiscono sostanze adatte allo scopo, come minerali, cristalli, vetro ecc. Questi corpi diventano luminosi, benchè i raggi ultravioletti non siano direttamente visibili al nostro occhio ; e come è noto la luminosità così emessa dai corpi fluorescenti è in generale di lunghezza d'onda più grande (o di frequenza più bassa) di quella eccitante.

Ma in conseguenza di tali proprietà, non è esatto il dire che il nostro occhio non *vede* la luce u. v. Infatti se si sperimenta con luce u. v. filtrata da una sorgente ricca di tali raggi (come un arco voltaico o meglio una lampada a vapore di mercurio), l'occhio che ne è colpito subisce un'azione dì annebbiamento confuso, dovuto alla fluorescenza del cristallino o degli umori nell'occhio stesso contenuti. Per filtrare la luce u. v., si può adoperare una soluzione alcoolica di nitrosodimetilanilina, oppure un vetro all'ossido di nichel. Questi corpi sono quasi perfettamente opachi alla luce ordinaria mentre lasciano passare una parte delle radiazioni più corte o rifrangibili. Si ottiene allora la cosidetta luce di Wood, che ha ricevuto applicazioni interessanti, in quanto che mediante essa si possono studiare fenomeni di fluorescenza di un gran numero di sostanze usate nella vita pratica ; permettendo così di ricavare criterii sulle loro qualità, o stato di conservazione, purezza ecc.

Alle azioni chimiche si è implicitamente fatto cenno, parlando della fotografia come mezzo per rivelare l'arrivo di onde u. v. Si può dire che, grazie all'azione esercitata sui sali di argento dalla luce u. v., si è potuto tanto progredire nel loro studio ; mentre che per le vibrazioni ultrarosse, manca assolutamente o quasi tale mezzo di studio.

Ma a parte le azioni fotografiche, i raggi u. v. esercitano svariatissime altre azioni di carattere chimico : d'onde la loro denominazione di raggi chimici. Essi producono per esempio con facilità azioni ossidanti. L'ossigeno stesso si trasforma se colpito da raggi u. v. in ozono : è noto che l'odore caratteristico di questo gas, si rivela intorno alle lampade di quarzo a vapore di mercurio.

Si è arrivato ad asserire che i raggi u. v. del sole, i quali fuori della nostra atmosfera debbono certamente raggiungere la zona di Schumann o quella di Lyman, possano aver prodotto la combustione del cianogeno che sembrava esser contenuto nella coda della cometa di Halley (1910) prima che si fosse avvicinata a noi. A parte la attendibilità di tale fatto, molti gas come idrogeno, idrogeno solforato ecc. sono *bruciati a freddo* se mescolati con ossigeno e colpiti da raggi u. v. Altri gas come acido cloridrico, sono dissociati ad una certa temperatura dalla luce u. v. Secondo una teoria di D. Berthelot, la luce u. v. agisce in molte reazioni chimiche fornendo l'energia necessaria, se le reazioni stesse sono reversibili. In altri casi e cioè nelle reazioni irriversibili la luce u. v. agirebbe solo da catalizzatore.

Citeremo ancora l'azione battericida della luce u. v. ; essa ha grande importanza nei processi di sterilizzazione delle acque. In generale per altro, perchè tale azione sia massima, occorre adoperare delle λ inferiori a 3000 A. Le lampade a mercurio in quarzo, danno abbondantemente di tali radiazioni che sono facilmente assorbite da una lastra di vetro comune.

È infine noto come la luce u. v. agisca sulla nostra epidermide ; tale fatto corrisponde al cosidetto *colpo di sole* delle alte montagne, che consiste in una epidermide più o meno intensa, pur senza mai arrivare a sintomi gravi. Ma le lampade dei nostri laboratori possono produrre invece delle irritazioni anche gravi nelle varie località del nostro corpo, specie negli occhi. Si sa infine come i raggi u. v., impiegati con opportune cautele, vengano utilizzati nella terapia di alcune malattie della pelle.

Ci rimane a dire qualcosa delle proprietà di natura elettrica delle radiazioni u. v. Il primo fenomeno del genere fu quello osservato da Hertz, sull'azione favorente di queste radiazioni, al passaggio della scintilla elettrica. Successivamente i lavori di Hall-

Digitized by Google

wachs e Righi hanno mostrato come anche una lastra metallica elettrizzata negativamente, perda elettricità, se colpita dalla luce u. v. Scoperto genericamente tale fenomeno, si sono grado a grado realizzati grandi progressi nella tecnica di osservarlo. Così mentre in principio l'effetto Hallwachs-Righi si otteneva principalmente adoperando dello zinco amalgamato, Elster e Geitel lo hanno dopo confermato per i metalli alcalini; con questa differenza, che per lo zinco occorrono radiazioni u. v. a brevissima λ, perchè il fenomeno si manifesti: e invece per i metalli alcalini, già le λ comprese nello spettro visibile bastano a provocare la scarica negativa. In conseguenza di ciò, l'azione sullo zinco, a differenza dell'altra, si può interrompere con l'interposizione di una semplice lastra di vetro sul percorso dei raggi, il che non nuoce per la constatazione della seconda.

Su tali ultimi fatti è fondata la costruzione delle cellule fotoelettriche, costituite da superficie di metallo sensibile (potassio, sodio, cadmio ecc.) rinchiuse in un tubo di vetro o di quarzo e circondata da una leggiera atmosfera di idrogeno, elio, o di altro conveniente gas. Sembra che le cellule fotoelettriche, se adoperate per studiare la luce u. v., presentino una certa superiorità sulle lastre fotografiche.

A parte l'interesse pratico che il fenomeno fotoelettrico ha nello studio delle azioni della luce u. v., o se si vuole anche della luce comune, questo fenomeno ha grande importanza dal punto di vista teorico. Esso, si può dire, ha dato origine a una serie di ricerche e di teorie che si sono mirabilmente innestate con altri fatti già conosciuti o scoperti come conseguenze di esso. Come diremo, Einstein è partito dalla considerazione del fenomeno fotoelettrico per l'estensione della teoria dei quanti concepita da Planck nel 1900, anche ai fenomeni di radiazione di natura corpuscolare.

Radiazioni corpuscolari.

Nei paragrafi precedenti, ci siamo occupati di quasi tutte le forme di radiazioni mano a mano scoperte, e che si possono interpretare mediante l'ipotesi delle vibrazioni eteree. All'infuori di queste, il quadro generale di tale forma di energia si è esteso per la scoperta di altre radiazioni che in nessun modo si possono riportare al fenomeno ondulatorio. In certa guisa, per la spiegazione di esse, si è dovuto far ritorno ad una concezione che sembrava definitivamente essere stata abbandonata dalla scienza, e cioè, a qualcosa che ricorda l'antica teoria della emissione, che Newton aveva formulato per la spiegazione dell'ordinario fenomeno luminoso. Le nuove radiazioni in parola si concepiscono infatti, come dovute alla emissione continua di speciali particelle, come ora sarà detto. Queste radiazioni corpuscolari si distinguono in due gruppi diversi: i raggi catodici e gli anodici.

Ma, notisi per la maggior chiarezza di quanto ora andremo esponendo, che la scoperta di tali forme di radiazione, avvenuta in parte fin dal 1869, ha successivamente e molto più tardi originato quella di un altro tipo di radiazione, che è stata in seguito interpretata ancora, come corrispondente a nuove radiazioni di carattere ondulatorio del solito mezzo etereo. Per cui questa origine giustifica il fatto che noi ora discorreremo dei raggi catodici ed anodici, per tornare in fine a dire di nuovo, dell'ultima forma di radiazione eterea che più tardi è stata trovata: e cioè dei raggi Roentgen.

Raggi catodici.

Dallo studio della scarica elettrica nei gas rarefatti eseguito già da Faraday, prende le mosse Hittorf, per sperimentare a pressioni sempre più ridotte. Osserva egli così, che in un tubo di vetro, sufficientemente vuotato di aria, e nel quale penetrano i due elettrodi (catodo e anodo), adduttori di una scarica elettrica, avvengono fenomeni luminosi che provocano la fluorescenza delle sue pareti. L'Hittorf trova così come tale fluorescenza sia dovuta ad un'azione che chiama *raggi di scarica*, e che proviene dal catodo, indipendentemente dalla cosidetta luce positiva. Per cui chiama ancora tali raggi anche *raggi della luce negativa*, o come si dice più semplicemente *raggi catodici*. Studia poscia il loro comportamento sotto l'azione di un campo magnetico, e trova che essi obbediscono alle stesse leggi imposte dalla presenza di questo campo ad una comune corrente elettrica mobile. Più tardi, e forse indipendentemente, Crookes (1878) riprende gli studi di Hittorf e definisce i raggi catodici come *materia raggiante*, quasi a indicare che essi siano dovuti ad un *quarto stato della materia*. Occorre però ricordare come egli, in tale terminologia, sia stato preceduto da Faraday che già nel 1816, parlava di materia raggiante, riferendosi a fenomeni di tutt'altro genere, all'infuori di quelli elettrici.

Secondo Crookes, i raggi catodici corrispondono ad una sorta di bombardamento di particelle materiali, provocato dal catodo. Egli ha dunque nettamente compreso la natura corpuscolare di questo agente, che per altro, con tutta sicurezza, chiama anche *radiazione*, come del resto aveva fatto in precedenza Hittorf: ne studia poi con ingegnose e semplici disposizioni, che portano precisamente il nome di tubi di Crookes, la propagazione rettilinea, la forza esercitata sulle pareti colpite, i fenomeni di fluorescenza provocati su molte sostanze, gli effetti di riscaldamento, e infine la deviabilità in un campo magnetico, già intravista dall'Hittorf. Il Crookes ritiene, ed in ciò soltanto errava nel suo giudizio, che le particelle catodiche corrispondano alle molecole gassose residue del tubo di scarica, lanciate dalla scarica stessa.

Per molti anni, la vera natura dei raggi catodici rimane piuttosto misteriosa. Si può solo stabilire che essi vengono arrestati dal vetro dell'ampolla generatrice; ma in certi casi si può poi riuscire a far loro traversare l'atmosfera; questo risultato è ottenuto dal Lenard, praticando un piccolo forellino sulle pareti dell'ampolla e ricoprendolo con una sottilissima lastra di alluminio. In tali condizioni peraltro, i raggi catodici sono presto assorbiti nel loro cammino; l'illuminazione che essi producono nel

Digitized by Google

gas ambiente indica frequenti collisioni delle particelle catodiche con le molecole gassose, e quindi spegnimento della loro energia cinetica. In conseguenza di tali urti si fa luogo alla formazione di ozono, come per l'azione della luce ultravioletta, per quanto la causa ne sia sostanzialmente diversa.

Solo dopo la scoperta dei raggi Roentgen o raggi X, di cui sarà detto appresso, si comincia a comprendere quale sia la natura dei raggi catodici. Senza seguire l'ordine storico, diremo che si riconosce anzitutto come esatta l'idea di Crookes sulla natura corpuscolare di tali raggi; ma il fisico inglese non aveva potuto prevedere l'estrema piccolezza di tali corpuscoli. Oggi sappiamo che, oltre alla molecola e all'atomo materiale, è necessario ammettere l'esistenza di un altro ente molto più piccolo, il cosidetto *elettrone*, per interpretare alcuni fenomeni fisici con tutto rigore. L'elettrone, che ha caratteristica di inerzia come la materia ponderabile, ha una massa che è solo 1/1860 di quella del più leggero atomo materiale, quello dell'idrogeno. A questa precisa nozione quantitativa, si arriva con le deduzioni e gli esperimenti di cui ora faremo cenno.

Vediamo intanto come si spiega, secondo le vedute moderne, la formazione dei raggi catodici. Si ammette che intorno al catodo o polo negativo di un tubo di scarica, avvenga una enorme caduta di potenziale elettrico, quando la rarefazione del tubo stesso ha raggiunto un certo limite (circa un milionesimo di atmosfera), e che anzi tale caduta rappresenti quasi tutta quella che è disponibile nel tubo stesso. Al catodo arrivano in conseguenza della scarica, dei grossi joni, ossia molecole o atomi jonizzati positivamente del gas residuo; ed essi danno luogo per urto alla formazione di elettroni, che sono precisamente componenti dei joni stessi. Allora gli elettroni acquistano velocità retrograda enorme e sono lanciati, normalmente alla superficie del catodo, verso le pareti da questo lontane. I raggi catodici sono dunque costituiti da elettroni o cariche negative, che viaggiano con grandissima velocità. Questa concezione è verificata anzitutto dal fatto che i raggi stessi, oltre ad essere apportatori di cariche negative, sono deviati anche da un campo elettrico, oltre che dal campo magnetico, come da tempo si conosce. Poi, metodi di rigorosa misura sono cercati e trovati, per determinare varie grandezze legate a tale complesso fenomeno. Per ciò, si trae profitto dalle proprietà conosciute di tali raggi, e propriamente dall'accennata loro duplice deviabilità nei campi anzidetti. Le grandezze che occorre determinare sono: la velocità v con cui si muovono le particelle; il valore e della carica negativa di ciascuna particella; e infine il valore m della massa materiale di esse. Infatti, quanto all'esistenza di quest'ultima grandezza, essa è sospettabile date le proprietà di inerzia dei raggi stessi, simili a quelle di una massa materiale della meccanica classica. Il problema della determinazione di queste tre grandezze è piuttosto complesso. Si comincia a trattarlo, traendo profitto dalla deviabilità, più volte accennata, dei raggi catodici nei due campi elettrico e magnetico. Si osserva anzitutto, che a tali deviazioni si deve opporre, per analogia con i fenomeni meccanici, l'inerzia della massa materiale m di ciascuna particella, che ha una velocità v e trasporta una carica e. Si comprende facilmente che, a parità di velocità delle particelle catodiche, se la massa materiale m cresce di pari passo con la massa elettrica e, rimangono inalterate le deviazioni, sia elettrica che magnetica delle particelle stesse. E cioè, queste dipendono soltanto dal rapporto e/m, fra queste due grandezze, e dalla velocità v. Poichè ora si hanno semplici relazioni, fra le deviazioni che una particella elettrizzata muoventesi con questa velocità v subisce in un campo magnetico od elettrico e il rapporto e/m, si comprende come sia facile determinare tanto la velocità v quanto il rapporto e/m. Come valori di v si trovano numeri che da 1/10 circa di quello esprimente la velocità della luce (300.000 Km/sec), possono arrivare a due terzi di questa. In ciò si ha una prova della attendibilità della natura corpuscolare dei detti raggi; perchè, se si trattasse di un fenomeno ondulatorio, a parità di mezzo trasmittente, la velocità dovrebbe essere costante. Per quanto riguarda il rapporto e/m, il valore espresso in unità assolute elettromagnetiche è di circa $1{,}77 \cdot 10^6$.

Una delle più belle vittorie riportate dalle nuove teorie fisiche enunciate in questi ultimi trent'anni, sta precisamente nella determinazione di tale rapporto. Infatti al numero citato (il cui significato si afferra anche con la sola conoscenza superficiale delle varie grandezze elettriche) si arriva con considerazioni di ordini di fatti disparatissimi, come i fenomeni fotoelettrici, i termojonici, i raggi del radio ed altri. E tale successo ha dato naturalmente la spinta alla preparazione di altre indagini, tendenti a determinare, oltre che il semplice rapporto e/m, i vari valori delle grandezze e ed m. A ciò si arriva mediante due dispositivi diversi immaginati il primo da Wilson e l'altro da Millikan. Questi due metodi danno risultati praticamente coincidenti e senza spiegarli, diremo che il valore della carica elettrica elementare e corrisponde a circa un centotrilionesimo dell'unità di carica elettromagnetica di quantità di elettricità. Anche qui si è verificata una coincidenza interessante; giacchè si è potuto comprendere come in altri fenomeni elettrici debbano ancora entrare in azione piccolissime quantità di elettricità indivisibili che sono esprimibili con lo stesso numero ora riportato: così dicasi dei fenomeni della conduzione elettrolitica. È dunque l'elettrone che si presenta allo studio del fisico in circostanze diverse e svariatissime. Esso ha sempre la stessa carica elettrica; di esso, conoscendosi come si è detto, il rapporto e/m è ormai possibile determinare la massa materiale m, che viene così valuata ad 1/1860 di quella dell'atomo dell'idrogeno, come più sopra si è detto.

A questo punto arriviamo a intravedere un ordine di idee assai delicato, secondo il quale si stabilisce un legame intimo fra fenomeni elettrici e meccanici. Le masse materiali presentano, come si è ricordato, il fenomeno dell'inerzia; definibile col dire che occorre un certo lavoro $mv^2/_2$ per fare acquistare ad esse una velocità determinata v. Ma anche se si vuole imprimere una velocità ad una massa puramente elettrica (se essa esiste), occorre compiere un lavoro. In-

Digitized by Google

fatti col suo movimento la massa elettrica viene a creare un certo campo magnetico, che equivale ad energia elettromagnetica, immagazzinata nello spazio. In base a tali considerazioni, si può dunque supporre che la massa elettrica dell'elettrone (ancorchè questo sia sprovvisto di massa materiale nel senso comune della parola) abbia un'inerzia di carattere elettromagnetico, che a noi può sembrare di natura meccanica. Per tutto ciò, si ammette oggi realmente che la massa dell'elettrone sia di origine elettromagnetica; e si potrà forse pensare ad estendere tale modo di vedere a qualsiasi massa materiale. Ma non è qui il caso di discorrere, senza l'ausilio dell'istrumento matematico, delle difficoltà che si incontrano a svolgere completamente tale concetto, del quale ci basterà aver soltanto fatto cenno.

Concludendo questo paragrafo, diremo che rimane stabilito essere i raggi catodici elettroni, ossia particelle ultime di elettricità negativa, che viaggiano con velocità paragonabile, ma sempre inferiore, a quella della luce.

Raggi canale o anodici.

Oltre ai raggi catodici, si manifesta nei tubi di scarica un'altra specie di radiazione, sebbene in modo meno evidente e meno facile ad essere studiato. Questa radiazione prende il nome di *raggi canale* o *raggi anodici*, o *raggi positivi*. La loro constatazione avvenne per opera di un altro fisico tedesco, il Goldstein, nel 1886. Essi si manifestano per il fatto che le ultime particelle gassose residue, elettrizzate positivamente o come si dice jonizzate per la presenza del campo elettrico, si precipitano sul catodo. Nelle disposizioni di Goldstein, tale catodo porta dei forellini o canali, nei quali i detti joni entrano e per inerzia arrivano nella parte del tubo di scarica situato posteriormente al catodo. In codesta parte non vi è campo elettrico, e le dette particelle continuano per inerzia nel loro cammino, dando luogo a fenomeni luminosi, per i loro urti con la materia gassosa residua; in conseguenza di ciò il cammino stesso è segnato da una scia luminosa di colore caratteristico.

Dopo la scoperta di Goldstein, fu trovato che questi raggi anodici sono deviati come i catodici, tanto dal campo magnetico quanto dall'elettrico; ma queste deviazioni sono molto più piccole e di solito, non facilmente osservabili. Si comprese allora come si avesse da fare con cariche positive, portate da masse materiali molto maggiori di quelle dei raggi catodici, e dotate di velocità notevolmente più piccole. Più esattamente, mentre la massa elettrica può uguagliare (o anche esserne un piccolo multiplo intero) quella della particella catodica od elettrone, la massa materiale della particella anodica è quella di uno o due atomi d'idrogeno, se il gas ambiente e idrogeno; o in generale dello stesso gas residuo che è contenuto nella ampolla o tubo di scarica. A queste determinazioni quantitative si è arrivati con metodi del tutto analoghi a quelli spiegati per il caso dei raggi catodici.

Lo studio dei raggi anodici ha aperto un importante capitolo dell'atomistica moderna. I cosidetti *spettrografi di massa* sono fondati sull'osservazione contemporanea (in un campo elettrico e in un campo magnetico sovrapposti) delle deviazioni dei raggi canali ottenuti mediante varii elementi chimici. Si sono così potuti ricavare criterii per comprendere come di tali elementi ve ne siano certi, che si comportano come miscugli di elementi con masse atomiche differenti.

Per chiarire sommariamente questa importante conclusione, faremo ora una piccola digressione. L'atomo, secondo le teorie moderne è costituito da un nucleo positivo, intorno a cui gravitano degli elettroni. La carica elettrica così risultante è nulla, giacchè la positiva del nucleo è compensata esattamente dalla negativa degli elettroni. Ma può avvenire che il nucleo centrale positivo, nel quale è concentrata quasi tutta la massa materiale dell'atomo, si alleggerisca di alquanto, pur conservando la stessa massa elettrica positiva. Da questa variazione di struttura, non derivano mutamenti nelle caratteristiche chimiche esterne dell'atomo ma per esempio nel caso del cloro si deve riconoscere che questo elemento, nel modo con cui ci si presenta in natura, deve necessariamente risultare da un miscuglio di atomi corrispondenti ai pesi 35 e 37, e ciò in dipendenza della diversa struttura dei nuclei rispettivi. Si giustifica così perchè a noi apparisca il cloro con un peso atomico che è la media proporzionale fra i due numeri citati, in relazione con le quantità dei due componenti a peso atomico 35 e 37 che si trovano in un campione di cloro naturale. Da ciò si deduce che questi elementi a peso atomico intiero (gli isotopi degli elementi comunemente conosciuti), derivano ciascuno da aggruppamenti fatti naturalmente con un numero intero di ultime particelle indivisibili di peso atomico uno: l'atomo dell'idrogeno. Con ciò torna in onore l'antica ipotesi di Prout sulla unicità della materia: tutti gli elementi chimici conosciuti risulterebbero da aggruppamenti più o meno numerosi di atomi dell'elemento più leggero conosciuto. Quali suggestive deduzioni ha dunque permesso lo studio di queste nuove radiazioni!

Raggi X.

Per la maggior chiarezza, appena compatibile con la necessaria concisione della nostra esposizione, abbiamo lasciato di discorrere di una scoperta avvenuta prima di molte fra quelle ora richiamate; e alla quale si deve probabilmente l'inizio del nuovo periodo di feconda attività delle scienze fisiche. Intendiamo parlare della scoperta dei raggi X avvenuta nel 1895, per opera di Roentgen. Questi, sperimentando sui raggi catodici, si accorge come dalle pareti di un tubo Crookes, fluorescenti per l'azione interna di quei raggi, si sprigioni una nuova specie di radiazione, con proprietà curiose e nuove. Essa è capace di traversare molti corpi opachi alla luce ordinaria ed in generale quelli aventi piccola densità. Per opera dello stesso Roentgen, e per quella

Digitized by Google

di numerosi fisici che prendono subito a studiare la nuova specie di raggi, se ne accertano presto le origini e le interessanti proprietà, che si differenziano nel loro insieme, da quelle di tutte le altre radiazioni conosciute. Si comprende anzitutto che essi sono dovuti all'urto degli elettroni, costituenti i raggi catodici, con le pareti del tubo di scarica; si verifica che essi non si riflettono, nè si rifrangono, almeno nella maniera solita ; eccitano la fluorescenza dei corpi ; impressionano le lastre fotografiche ; e in queste ultime proprietà presentano quindi analogie con i raggi ultravioletti e con i catodici ; non sono però deviabili nè da un campo magnetico nè da un campo elettrico ; ma scaricano entrambe le cariche elettriche, jonizzando fortemente i gas che tarversano.

Diremo subito, che mentre si svolgono gli studi cui più sotto sarà fatto cenno, si perfeziona la tecnica costruttiva dei tubi, necessari alla produzione dei raggi X. All'anticatodo larghissimo dei tubi Crookes è sostituito un piccolo e spesso disco di platino prima e di tungsteno poi, sul quale il fascio di raggi catodici, dato da un catodo concavo, si concentra. La sorgente di raggi X in questi *tubi focus*, diventa molto ristretta e intensa, ottenendosi il grande vantaggio di una maggiore nitidezza nelle radiografie. Più tardi, il modo di generazione dei raggi catodici è modificato nei tubi Coolidge, nei quali il catodo è sostituito da un filamento incandescente ; in questi tubi è utilizzata l'emissione termojonica di tale filamento ed in essi non ha alcun ufficio l'atmosfera residua che è portata al massimo grado di rarefazione. È noto come questi tubi Coolidge diano i più potenti effetti di produzione di raggi X.

La natura dei raggi X, dopo la loro scoperta, rimane per qualche anno misteriosa, malgrado il vago accenno fatto dallo stesso Roentgen alla probabile loro origine vibratoria del mezzo etere. In un primo tempo è per altro difficile sperimentare con tali raggi, in causa della assoluta mancanza, da loro parte, di talune proprietà di carattere ottico. Infatti, è sullo studio di queste proprietà che il fisico si fonda per analizzare le varie altre specie di radiazioni.

Si comincia però a constatare che i raggi X provocano l'emissione di raggi cosidetti secondari da parte dei corpi da essi colpiti; tanto che, circa dieci anni dopo la scoperta dei raggi X, è possibile al fisico inglese Barkla di distinguere varie serie di tali raggi secondari ; che egli chiama *K*, *L*, *M*. Nel compiere tali studi il Barkla si accorge che i raggi stessi sono, per lo meno, parzialmente polarizzati. Questo fenomeno orienta decisamente i fisici verso la credenza che i raggi X siano costituiti da perturbazioni dell'etere cosmico, come la luce. Da principio, si ritiene però che essi non debbano avere carattere nettamente periodico, ma debbano piuttosto consistere in onde di scuotimento o di esplosione trasmesse all'etere. Ma subito dopo, l'idea di una periodicità assai maggiore che non quella della luce u. v. si fa strada, per quanto riguarda la costituzione dei raggi X. Seguendo anzi tale concetto, si comprende dal fisico Laue, verso il 1912, che se esso fosse esatto, nessuno dei reticoli di diffrazione conosciuti, avrebbe permesso di ottenere spettri di diffrazione, perchè le loro righe sarebbero state troppo lontane l'una dall'altra. Infatti la teoria elementare del reticolo fa vedere come la distanza dei tratti di esso debba essere dello stesso ordine di grandezza delle lunghezze d'onda da diffrangere; anzi alquanto più grande di questa; ma in ogni caso non superiore ad una diecina di volte. Laue pensa nel 1912, come si è detto, che non sarebbe stato mai possibile costruire reticoli di molto più fitti di quelli adoperati in ottica e le cui righe distano per circa due micron. Ma riflette poi che in natura esistono i cosidetti *reticoli spaziali*, costituiti dalle sostanze cristalline, che con la loro struttura regolare si debbono comportare in maniera analoga, quantunque più complessa, a quella dei reticoli artificiali. Essi, invece di essere formati da tante righe incise su sostanza opaca alle radiazioni, risultano costituiti dalle singole molecole od atomi che si succedono con tutta regolarità nello spazio, e con legge differente da caso a caso, dipendentemente dalle particolari caratteristiche cristalline. Laue ha così l'idea che questi reticoli spaziali naturali, o sostanze cristalline possano dar luogo a fenomeni di diffrazione. E tale previsione è brillantemente verificata dall'esperienza, per parte di altri due fisici Friedrich e Knipping. Ciascun elemento costitutivo del cristallo colpito infatti dai raggi X, diventa centro di diffrazione ; e dei punti o località dello spazio esterno ricevono, per una determinata specie di raggi X, dei massimi di questa energia raggiante. L'esperienza di questi fisici, fondata su tale concetto è semplicissima : basta far passare un pennello di raggi X, attraverso una lamina, perchè esso venga diffratto dai singoli atomi di questa, e i raggi secondari così formati vengono a interferire tra di loro. Una lastra fotografica situata al di là, registra le immagini di Laue, costituite da macchioline distribuite variamente e che ricordano quale sia la simmetria della lamina cristallina impiegata. Così p. e. è quaternaria, se si tratta di lamina cristallina tagliata da un cubo parallelamente ad una faccia ; ternaria, se ancora il cubo è stato tagliato parallelamente a una delle sue grandi diagonali, ecc.

Tutto ciò è conseguenza della natura ondulatoria dei raggi X ; e può illuminarci sul valore delle loro lunghezze d'onda. Ma indipendentemente dai diagrammi di Laue di cui si è detto, le sostanze cristalline permettono di realizzare dei veri spettrografi, per studiare quale sia la costituzione di un complesso fascio di raggi X. All'uopo, ci si serve di una lamina cristallina che rifletta questo fascio proveniente da una sottile fenditura. Se esso fosse monocromatico (costituito da una sola λ) si formerebbe un solo raggio riflesso, quando fosse verificata una certa relazione tra λ e la distanza fra i vari piani reticolari, determinata dal modo con cui le particelle del cristallo sono distribuite nello spazio. Occorre dunque, per osservare la macchia o riga immagine della fenditura, riflessa da una lamina cristallina su una lamina fotografica, o registrata da un elettroscopio, che questa lamina formi un certo angolo determinato con il fascio di raggi. Si sono adottati allora due artifici: o si fa rotare il cristallo sino ad ottenere l'azione dei raggi diffratti per riflessione (metodo di Bragg o De Bro-

Digitized by Google

glie), oppure si adoprano degli ammassi cristallini irregolari fermi, su cui cadono i raggi X (Debye e Scherrer) tra cui ve ne saranno taluni che soddisferanno alla legge della riflessione e che daranno realmente l'immagine. Se poi il fascio di raggi X non è monocromatico, si hanno tante immagini corrispondenti alle varie λ. Lo studio dei risultati che si ottengono da tali dispositivi porta alla conoscenza sia della λ dei raggi impiegati, sia a quella della struttura del cristallo. Per quanto concerne la lunghezza d'onda dei raggi X, risulta così che essa si aggira intorno a qualche unità Angstrom.

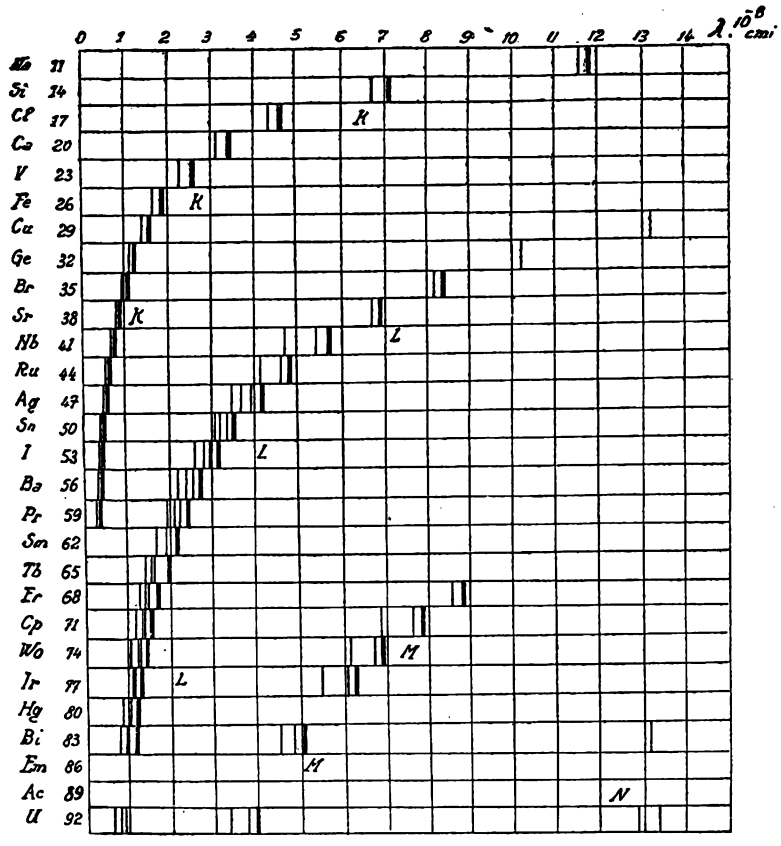


Fig. 2. – Diagrammi delle lunghezze d'onda ad alta frequenza, emesse dai vari elementi chimici.

La distribuzione parabolica corrisponde alla legge di Moseley.

La scoperta di Laue è estremamente interessante non solo per i motivi accennati, ma ancora perchè la tecnica da essa derivante ci illumina sul modo con cui i raggi X sono generati, e sulla loro promiscua costituzione. Al riguardo, si è arrivati alle seguenti deduzioni. Quando i raggi catodici cadono su di un anticatodo metallico, si ottiene da questo il miscuglio di uno *spettro continuo* (simile a quello dato dai solidi nel campo visibile dello spettro) e uno *spettro caratteristico* o a righe, il quale ultimo dipende dalla struttura dell'atomo del metallo impiegato nella costruzione dell'anticatodo. Ciascun elemento chimico, in generale, dà in tali condizioni un suo spettro proprio, con righe che lo caratterizzano in modo indubbio. Man mano che il peso atomico dell'elemento cresce, le lunghezze d'onda delle sue righe spettrali di raggi X vanno diminuendo. Ora, col diminuire di tali lunghezze d'onda, ossia col crescere della frequenza delle vibrazioni, cresce anche il loro potere di penetrabilità attraverso i corpi. Per cui, volendo ottenere raggi molto penetranti o come si dice *duri*, occorre costituire gli anticatodi dei tubi per raggi X con sostanze a peso atomico elevato. Si adopera all'uopo, come si è detto, il tungsteno.

L'emissione dei raggi caratteristici obbedisce poi a interessanti leggi che si enunciano in modo più semplice di quanto non sia possibile per la luce comune o per le radiazioni ad essa prossime. Anzitutto, per ciascun elemento, le varie righe sono disposte in aggruppamenti o serie distinte formate da più linee relativamente prossime, come è indicato nella figura 2. In questa sono riportati su di un asse i numeri atomici dei vari elementi a cominciare, in alto, dal sodio fino all'uranio (da 11 a 92). Questi numeri corrispondono all'ordine di successione degli elementi nella tabella di Mendelejeff. Sull'altro asse sono riportate le varie lunghezze d'onda in Angstrom, o in centimetri (essendo il rapporto fra queste unità 10^{-8}).

Digitized by Google

Nella figura si osservano le serie *K*, *L*, *M*, *N*, di righe dei raggi *X*, la cui denominazione era già stata data dal Barkla. Si vede che per esempio, le varie serie *K* dei diversi elementi sono disposte all'incirca su di una curva parabolica, che va *cadendo* dalla parte dei corpi a numero atomico più elevato. Così mentre per il sodio si hanno righe *K* intorno a 12 *A*, per il bario tali righe *K* si accumulano intorno a 0,4 *A*. Aspetto analogo ha l'insieme delle serie *L*, delle *M*, delle *N*; quantunque per queste ultime la curva parabolica non abbia modo di svolgersi chiaramente. Lo studio accurato di tale disposizione delle differenti serie spettrali, fa vedere che si può arrivare per gli elementi più pesanti alle serie *O*, *P*. Si rileva dalla figura che per ottenere un maggior numero di serie spettrali per lo stesso elemento, occorre sceglierlo fra quelli a numero atomico elevato. La distribuzione parabolica delle serie in parola, corrisponde alla legge di Moseley, secondo cui, considerando p. e. le righe a λ più lunghe delle varie serie *K*, *le* λ *vanno decrescendo in ragione inversa del quadrato del numero atomico.*

Questa legge, che non si verifica però con rigore assoluto, è utilissima nello studio delle proprietà spettroscopiche dei vari elementi, e ha dato brillanti risultati anche per quanto concerne la ricerca o la scoperta di nuovi elementi. Infatti la posizione delle righe che questi debbono avere è a priori individuabile; così è avvenuta recentemente la scoperta del Florenzio, per parte di Rolla e Brunetti (numero atomico 61).

Occorrerebbe molto più spazio di quanto a noi è consentito, per spiegare come questi fenomeni si interpretino al lume delle moderne teorie sulla struttura dell'atomo. Reciprocamente si può dire che l'esame spettroscopico in genere, fa comprendere quale sia la costituzione degli ultimi elementi della materia.

Radio-attività.

Subito dopo la scoperta dei raggi X, Becquerel, nel 1896, prende a ricercare se, con artifici diversi da quello usato da Roentgen, possano ottenersi radiazioni con caratteristiche analoghe. Scopre così che l'uranio e i suoi sali emettono debolissimi raggi, capaci di traversare i corpi leggeri, comunemente opachi alla luce ordinaria, e di impressionare la lastra fotografica. Successivamente si trova che gli stessi corpi hanno la proprietà di scaricare lentamente i corpi elettrizzati: le prime sostanze radioattive sono così scoperte. Per opera poi dei coniugi Curie, è trovato due anni dopo che anche altri corpi hanno proprietà simili all'uranio; e servendosi dell'elettroscopio, come mezzo di ricerca chimica, arrivano a separare da grandi quantità di minerale, composti nuovi contenenti elementi chimici sino allora sconosciuti, che hanno un'azione radioattiva assai superiore a quella dell'uranio. Così è scoperto il corpo più radioattivo che si conosca il *radio*, e i suoi sali. Il peso atomico di questo corpo è 226; il numero atomico 88; esso viene ad occupare una casella, che era prima vuota, della tabella di Mendelejeff. Complessivamente oggi, gli elementi radioattivi sono circa una trentina; di essi, prima del 1898, ne erano conosciuti soltanto due: l'uranio e il torio.

Presto si riconosce che i raggi emessi da questi elementi o dai loro composti, oltre ad avere caratteristiche dipendenti soltanto dalla struttura dell'ultima particella accessibile al chimico (l'atomo), e non dal modo con cui questa è congiunta ad altre particelle, simili o di altri corpi, non sono omogenei. Essi risultano cioè come il miscuglio di radiazioni di specie diversa. A tale risultato si è arrivati, cercando di vedere quali azioni vengono esercitate su questo miscuglio, dai campi magnetici od elettrici. Si è trovato così, che una sostanza radioattiva può emettere tre specie distinte di raggi denominati *alfa*, *beta*, *gamma*, con intensità variabile a caso a caso. Ora, noi già conosciamo raggi che hanno proprietà analoghe a ciascuna di queste specie; anzi con esse veramente si identificano, almeno per quanto riguarda la loro natura. Infatti, mentre i raggi *alfa* e *beta* restano deviati dai campi magnetici ed elettrici, in maniera del tutto simile ai raggi anodici e catodici, rispettivamente; i raggi *gamma*, analogamente ai raggi X, non sono affatto deviati da tali campi. Inoltre, con metodi analoghi a quelli visti, parlando dei raggi anodici e catodici, si sono potute determinare anche per gli *alfa* e i *beta* i valori del rapporto *e/m*; e si sono trovati gli stessi numeri, anche per le sostanze radioattive. Questi fatti bastano da soli a stabilire la natura corpuscolare degli *alfa e* dei *beta* e quella ondulatoria dei *gamma*. Vi ha però qualche differenza di carattere quantitativo. Mentre gli *alfa* sono sempre costituiti da atomi di elio, i raggi anodici, come si è detto, possono risultare dal lancio di atomi anche più pesanti, dipendentemente dalla natura chimica della sostanza gassosa eccitata nei tubi di scarica. Come conseguenza di questo fatto, si comprende che le sostanze radioattive vadano lentamente trasformandosi; dappoichè, sotto forma di radiazione corpuscolare, emettono continuamente questo elemento leggero che si chiama elio. In oltre, i raggi *beta* risultano costituiti da puri elettroni animati da grandissima velocità, talvolta superiore a quella dei raggi catodici, che già conosciamo, e dai quali si differenziano solo per la maggiore penetrabilità nei corpi. Infine, i raggi *gamma*, sono bensì raggi X, ma la loro λ può essere soltanto di 0,3 *A*; e il loro potere penetrante è enorme; tanto che essi possono ancora traversare uno spessore di piombo di più che 20 cm.

L'atomo radioattivo è un minuscolo fornello, di potenza peraltro grandissima, in continua attività; esso perde ininterrottamente joni positivi ed elettroni, dando luogo oltre che alla formazione di elio, a quella di altri corpi con proprietà radioattiva, ma di minore stabilità. Le leggi di tali trasformazioni sono state accuratamente studiate per le varie sostanze; sono tutte dello stesso tipo (leggi esponenziali), e si arriva a stabilire per ogni sostanza, la probabile durata del totale processo di disintegrazione atomica. Così, per il radio tale durata o vita è di circa 1800 anni. E questo tempo è enormemente piccolo di fronte a quello che compete all'uranio; il quale corpo, pur

Digitized by Google

avendo un peso atomico più elevato, è assai più stabile, ed ha proprietà radioattive assai meno marcate. Si calcola che la vita dell'uranio possa essere di cinque miliardi di anni; e si pensa che il radio sia un suo prodotto di trasformazione.

Il radio dà luogo, trasformandosi, a un corpo che è stato denominato *emanazione*. Questa ha proprietà radioattive di intensità paragonabile a quella del radio; ma la sua durata o vita è soltanto di qualche giorno o settimana. Ciononpertanto questo prodotto di disintegrazione del radio, che può essere raccolto in tempo relativamente breve, è utilizzato per uso terapeutico, giacchè, essendo piccolo il suo valore commerciale, può essere distribuito facilmente e periodicamente agli specialisti che lo adoperano.

Collegamento fra i raggi u. v. e i raggi X. Raggi di Holweck.

Le maggiori lunghezze d'onda per i raggi X conosciute prima del 1922, sono constatate studiando le radiazioni caratteristiche di taluni metalli; così, tanto una linea K del sodio, quanto una L dello zinco, hanno una λ che si aggira intorno a 12 A. Le più piccole λ della luce u. v.; sono state constatate da Millikan ed hanno, come si è visto, il valore di 136 A. Fino al detto anno 1922, vi è dunque l'intervallo compreso fra 136 e 12 A, corrispondente a circa 3,5 ottave, nel quale non è stata osservata alcuna radiazione. Ricerche interessanti di Holweck, eseguite recentemente, permettono ora di colmare anche questa lacuna. Per arrivare a questo risultato, occorre rendersi conto anzitutto delle ragioni per cui non era stato sin allora possibile, osservare radiazioni dentro il detto intervallo. Ciò è dovuto più che alla mancanza delle radiazioni in parola, alla difficoltà di constatarle. Infatti, al di sotto di 12 A, è difficile disporre di reticoli naturali abbastanza larghi: il più opportuno è quello dato da cristalli di dietiltiogliolato di sodio ed argento, che ha una distanza reticolare di 19 A, già troppo piccola anche per le $\lambda = 12$ A. Dal lato della luce ultravioletta, i reticoli artificiali di circa 2 micron di distanza reticolare sono troppo grossolani per scendere al di sotto del limite trovato da Millikan di 136 A. Queste considerazioni fanno comprendere come occorra girare la difficoltà, ricercando artifici di natura adatta alla rivelazione delle λ in parola. Si arriva quindi al collegamento fra i raggi u. v. ed i raggi X, perfezionando anzitutto il modo di generazione questi ultimi, in guisa che essi siano della massima possibile *mollezza* (ossia della maggiore λ), e, in secondo luogo, ricorrendo ad un criterio del tutto diverso, per l'apprezzamento della lunghezza d'onda. Si è già detto che un corpo solido, colpito da elettroni, lanciati con una determinata velocità, emette due sorta diverse di radiazioni: uno spettro caratteristico a righe e uno spettro continuo. Quest'ultimo è costituito in maniera analoga alla luce bianca, cioè in esso sono comprese tutte le λ possibili entro certi limiti estremi. Ora, a questa radiazione continua, si può applicare ancora la legge di distribuzione di energia trovata per il corpo nero, espressa dalla formula di Planck. È dunque sempre la teoria dei quanti di energia che entra in giuoco; e la sua applicazione fa vedere che necessariamente questo spettro continuo, dovuto agli urti degli elettroni sul corpo in esame, si ferma bruscamente ad una certa lunghezza d'onda minima; al di là di questa non è possibile che siano emesse altre vibrazioni. Il concetto proviene dalla considerazione che ciascun elettrone (di carica e) animato da una certa velocità v (che è tanto più piccola quanto minore è la caduta V della intensità del campo elettrico circondante il catodo) non possiede che il quanto di energia eV. Questo quanto non può generare al più che una frequenza massima di irradiazione $\lambda_{max.}$ tale che il suo prodotto $h\nu_{max.}$ con la costante di Planck h, sia uguale precisamente ad eV. Questa eguaglianza è stata intuita da Einstein e rappresenta una estensione delle teorie dei quanti ai fenomeni di irradiazione corpuscolare. La detta frequenza massima corrisponde alla lunghezza d'onda minima, limite degli spettri che si osservano. La esattezza o almeno la grande attendibilità di tale legge è stata variamente verificata con l'esperienza, tanto da ritenere che su di essa non può ormai cadere alcun dubbio. Vi è ora un mezzo per separare dalle radiazioni promiscue dello spettro continuo di raggi X, ottenuto come si è detto, le λ più brevi. È noto che i corpi assorbono variamente i raggi X, e tanto più facilmente quanto maggiore è la lunghezza d'onda di questi, ciò almeno se tali corpi non hanno un potere assorbente anomalo. Da ciò risulta che di un fascio di raggi X, la cui intensità è ridotta per assorbimento p. e. al 90 %, i *raggi restanti*, cioè quelli che traversano completamente il corpo assorbente, sono di preferenza quelli di minima λ. Nell'esperienze di Holweck, i raggi catodici sono generati da un filamento incandescente posto nel vuoto più perfetto, ed elettrizzato solo a 25 Volt. Da esso partono elettroni che vanno a colpire una sottile lamina di molibdeno, situata solo ad 1 mm. di distanza dal filamento. Sulla lamina avvien la formazione dei raggi X, ed essi la attraversano facilmente, dato il suo piccolo spessore, ancorchè abbiano una grande λ. I raggi stessi entrano poi in una camera di jonizzazione, che è separata da quella in cui essi si sono formati, da una foglia di celluloide, di appena un decimo di micron di spessore, ma capace di resistere anche a 5 cm. di pressione; nella camera di jonizzazione si trova oltre l'elettroscopio per studiare gli effetti dei raggi X selezionati, il gas od altro mezzo assorbente, alla pressione massima consentita dalla lamina di celluloide. Da un canto si vengono così a selezionare raggi X sensibilmente monocromatici, e di λ prevedibile secondo la formula di Einstein; dall'altro si studia l'assorbimento di tali raggi. Dal confronto di questi due risultati con il modo di comportarsi, già conosciuto dei raggi u. v. o X estremi (cioè ai limiti dell'intervallo che ora si cerca di colmare), Holweck deduce che la lunghezza d'onda dei raggi X da lui ottenuti arriva sino a 493 A. Ricordiamo come Millikan sia arrivato con le λ dell'u. v., a 136 A; il valore ora raggiunto da Holweck si trova perciò al di qua della regione di

Digitized by Google

Millikan, anzi quasi già nella regione di Lyman, che aveva per la luce u. v. raggiunto il limite di 510 *A*. Per cui, l'intervallo compreso fra 493 e 12 *A*, è stato completamente occupato dalle radiazioni di Holweck, ottenendosi anzi la sovrapposizione di due ottave circa (da 493 a 136) tra i raggi X e gli u. v. In questo tratto le radiazioni possono essere denominate indifferentemente con i due nomi ; esse sono assolutamente identiche tantochè si generino con processo di eccitazione elettrotermica della materia, che per urto degli elettroni su di un conveniente ostacolo. E così, passo a passo si può seguire il variare delle proprietà di tali radiazioni, andando dal limite dello spettro visibile sino a quello dei raggi X.

D'altra parte, anche la continuità fra raggi X e *gamma* è assicurata. Infatti, mentre, per esempio una riga di raggi X della serie *K* del platino corrisponde a $\lambda = 0{,}158\ A$, la λ di una radiazione *gamma* del radioattinio, è notevolmente più lunga (0,390 *A*). Per cui, ininterrottamente le radiazioni invisibili si estendono dal limite tra le visibili e l'ultravioletto, fino a quello delle più penetranti, date dalle sostanze radioattive con una λ uguale a qualche centesimo di unità Angstrom soltanto.

Radiazione penetrante.

Per terminare la sommaria esposizione di questo articolo, dobbiamo accennare ad un'altro tipo di radiazione, la cui esistenza, se non è stata provata in modo assoluto e diretto, come per le altre di cui sinora ci siamo occupati ; è stata sospettata come assai probabile. Infatti essa sembra messa fuor di dubbio dalle recentissime ricerche compiute dallo stesso fisico americano Millikan, di cui più volte si è parlato.

Era stato notato sin dal 1903, che un elettroscopio carico, va perdendo la sua carica più lentamente (il suo potenziale si riduce a una data parte del primitivo valore, in un tempo una volta e mezza più lungo) se lo si richiude in una camera metallica con spessore di pareti di più centimetri. Il fatto fu già allora interpretato ammettendo che talune radiazioni, simili alle *gamma* del radio, penetrassero dal di fuori, dentro l'ambiente dell'elettroscopio. Tali radiazioni furono chiamate *radiazioni penetranti ;* e il fenomeno fu attribuito da McLennan e Burton e da Rutherford e Cooke, a radiazioni provenienti da corpi radioattivi situati nella crosta terrestre o nell'atmosfera.

Più tardi, per opera di vari fisici, si osserva che il fenomeno sussiste anche quando l'elettroscopio è trasportato in pallone sino a 9 Km. di altezza. Le esperienze in tale senso sono eseguite da Gockel in Isvizzera e da Hess e Kolhoerster in Germania. Si constata anzi che il fenomeno in parola si accentua in tal guisa, sino a diventare 8 volte superiore, alla detta altitudine.

Le esperienze sono riprese con altro criterio più tardi ancora da Millikan, in collaborazione di Pearson, nel 1921. Questo fisico costruì degli elettroscopi registratori che portati da palloni sonda, di circa 1 m. di diametro, raggiungono le più alte regioni dell'atmosfera. Due di tali palloni pervengono sino a 11 e 15 Km. rispettivamente di altitudine, e sono poi raccolti a circa 8 miglia dal punto di partenza. Millinkan trova dall'esame dei diagrammi degli elettroscopi registratori, confermate con evidenza le conclusioni a cui erano arrivati i precedenti sperimentatori, quantunque noti un netto disaccordo quantitativo tra le proprie osservazioni e le precedenti.

Per far comprendere i metodi adottati da questo fisico e la attendibilità dei loro risultati, occorre vedere come da essi possano trarsi dati quantitativi. Anzitutto, il modo più o meno rapido con cui un elettroscopio perde la sua carica, viene espresso con joni per centimetro cubo e minuto secondo di tempo ; intendendo con ciò che la causa incognita che produce tale scarica, dia origine alla formazione di un numero *I* di tali joni o corpuscoli elettrizzati, in un senso o nell'altro, e che producono col loro arrivo sull'armatura dell'elettroscopio, la scarica o la dispersione di altrettanta elettricità.

Così il Millikan, nelle sue esperienze coi palloni sonda trova che tale numero *I* è di 46 joni, all'altezza di 5 km., mentre è solo di 15 joni in basso. Ma questo risultato non è senz'altro interpretabile ; e altre osservazioni in condizioni diverse si rendono necessarie. Occorre anzitutto togliere il dubbio che le osservazioni stesse non siano influenzate dall'ora del giorno : se il fenomeno che si studia fosse originato o dall'aria o dalla terra eccitata dai raggi solari, o da qualcuno dei vari corpi celesti, la sua entità dovrebbe variare nel corso della giornata. Millikan a tal fine trasporta i suoi apparecchi sul picco Peak (4300 m.) o sul monte Whitnej Trail (4300 m.), ed entro l'approssimazione di qualche centesimo, trova che la jonizzazione è costante nelle varie ore del giorno. I suoi elettroscopi sono schermati con piombo (11 cm. in cima, 5 cm. ai lati, aperti in basso).

Gli esperimenti in cima al picco Peak rivelano inoltre un'azione secondaria che getta molta luce sul complesso fenomeno. In seguito ad una tormenta di neve che ricopre la località, di uno spesso velo bianco, è notato un'abbassamento nei valori di *I*. Ciò fa comprendere come talune delle radiazioni presenti prima della bufera di neve, siano di origine locale ; esse vengono schermate per la presenza della neve, che è per suo conto completamente inattiva, provenendo dalla condensazione di pura acqua. Oltre a ciò, Millikan stabilisce un confronto tra le intensità delle radiazioni alla cima dei monti citati e quella constatata più in basso all'osservatorio di Pasadena. Osserva poi che in queste località il potere jonizzante delle radiazioni è circa la metà di quello nei monti.

Tali ed altre considerazioni portano Millikan a stabilire una caratteristica importante delle radiazioni in parola, concepite come di provenienza esterna alla terra : essa consiste nella facilità con cui le radiazioni stesse vengono assorbite dall'atmosfera. Si può equiparare questa (che ha come è noto densità decrescente coll'altezza), a tanta acqua supposta di conveniente spessore. Da un semplice calcolo che eguaglia la massa dell'atmosfera a quella dell'acqua,

Digitized by Google

si vede come occorrano circa 7 metri di acqua per raggiungere la stessa massa materiale data da tutto lo spessore dell'atmosfera che circonda la terra. E allora si tratta di determinare quale sia la riduzione nella intensità delle radiazioni in parola, provocate dall'unità di spessore di acqua. Una formula esponenziale stabilisce che $I = I_0\ e^{-\mu d}$, dove I_0 è l'intensità (o la jonizzazione che provoca la scarica dell'elettroscopio) prima dello spessore d, I e la intensità dopo, e μ è il coefficiente di assorbimento. Se si esprime d in metri di acqua (corrispondente a uno spessore di atmosfera di eguale massa) dalla detta formula si ha per osservazioni di Millikan, $\mu = 0{,}25$. Questo valore è notevolmente più basso di quello che era stato trovato dagli sperimentatori tedeschi precitati ($\mu = 0{,}57$) e induce il fisico americano a creder che i sospettati raggi sieno dotati di un grande potere penetrante, cioè abbiano una grande facilità di traversare la materia. Nella formula vista, risulta infatti che occorrono da 2 a 3 metri di acqua traversata, per ridurre la intensità delle radiazioni alla metà, il che corrisponde a 3 o 4 mila metri di atmosfera.

Data l'importanza di tali conclusioni, lo stesso Millikan si è preoccupato di cercare ulteriori verifiche o conferme della loro attendibilità. Occorreva anzitutto verificare se realmente l'azione misteriosa in parola si affievolisce sicuramente, quando tra il mondo esterno e la terra fosse interposto ad arte un conveniente ostacolo. Per cui egli intraprende ricerche, scegliendo come mezzo schermante uno naturalmente di grande estensione e profondità, sprovvisto di proprietà radioattive ; quale è dato dalla massa di acqua di un lago, proveniente direttamente dalla fusione delle nevi. All'uopo le esperienze sono condotte nei due laghi Muir e Arrowhead, a più di 3000 m. sul livello del mare; immergendo in esse l'elettroscopio registratore ad una profondità di circa 20 m. È osservato allora che alla quota di m. 15, avviene la sparizione delle radiazioni penetranti ; al di là di questa profondità rimane ancora un'azione residua, che è dovuta a radiazioni locali. Si deduce da ciò che i 15 m. di acqua, più altri 7 m. circa equivalenti all'atmosfera (in tutto m. 22 di acqua, oppure a m. 1,90 di piombo), danno lo spessore limite che può essere traversato dalle radiazioni penetranti di origine cosmica, arrivanti sulla nostra terra. Tali radiazioni cadono su noi uniformemente, da tutte le direzioni, dappoichè come si è detto, non si è constatata alcuna differenza di azione, nelle varie ore del giorno.

Un passo ulteriore è stato compiuto da Millikan. Se si suppone che le radiazioni in parola, altro non sieno che vibrazioni eteree di piccolissima lunghezza d'onda, e cioè ancora più corta di quella dei raggi *gamma* del radio più penetranti, una formula data dal Compton permette di calcolare quale debba essere tale lunghezza d'onda, tenendo conto del potere penetrante dei raggi in questione. Millikan ha fatto questo semplice calcolo, e ha trovato che le λ delle radiazioni penetranti, da lui con tanto acume studiate, varierebbe tra i limiti 0,00038A e 0,00063A. Cioè si tattrerebbe di λ circa 50 volte più corte delle radiazioni *gamma* del radio. Non solo, ma si può calcolare quale debba essere il potenziale elettrico, o per dir meglio quale debba essere la caduta di potenziale attraverso cui un elettrone debba muoversi, capace di dar radiazioni eteree tanto rapide : si trovano così cifre dell'ordine di 32 milioni di Volt.

Secondo il pensiero di Eddington e Jeans si debbono riguardare tali raggi cosmici come dovuti alla riunione di elettroni a protoni ; e cioè come il processo di formazione degli atomi pesanti, a partire dall'idrogeno che è il più leggero. Inoltre, la teoria farebbe vedere che tale processo potrebbe produrre raggi anche di soltanto 0,00013 A, cioè di lunghezza d'onda 30 volte più piccola di quella osservata da Millikan. Ma a simile conclusione si oppone il pensiero di questo fisico; giacchè egli ritiene che sia da scartarsi l'ipotesi ora enunciata, che non sarebbe compatibile con la retta applicazione di deduzioni derivanti dal così detto effetto Compton, il quale consiste nella trasformazione di una frequenza in altra più bassa.

Abbiamo riportato con maggiore dettaglio, quantunque sempre in modo succinto, i risultati del Millikan, perchè essi rappresentano quanto di più recente sia stato scoperto od osservato in materia di nuove radiazioni ; e per mostrare con la citazione degli accorgimenti avuti dai varî sperimentatori, quanto sia attendibile la reale esistenza di questa nuova e sottile forza della natura. Ci sarebbe da divagare sulla origine di tali radiazioni ; ma basta già il cenno di esse fatto, per far comprendere che, se tutto quanto è stato detto è, come pare, scevro da possibili critiche, tale origine vada cercata nella formazione dei mondi lontani : le nebulose. In esse, si avrebbero fenomeni energetici di una potenza, in confronto della quale, quella del nostro sole poca cosa sarebbe : enormi temperature, campi elettrici e magnetici rappresentabili solo con cifre favolose, e, in origine, materia in uno stato di grande dissolvimento : forse il solo atomo di idrogeno. Man mano avverrebbe la condensazione di essa in nuclei più pesanti : gli atomi dei varî elementi andrebbero formandosi, a cominciare dall'elio, se non dal preteso nebulio. E da ciò deriverebbe quella formidabile liberazione di energia raggiante, che darebbe luogo alle radiazioni penetranti, studiate da Millikan, e alla pallida luce delle lontanissime nebulose.

Conclusione.

In questa rapida rivista ci siamo incontrati in due specie differenti di radiazioni. Nella prima trovano posto quelle di natura ondulatoria od eterea; e di essa fanno parte le radiazioni elettriche, le calorifiche, le ultrarosse, le ultraviolette, i raggi X, i raggi *gamma*, e, se vogliamo, le radiazioni ultrapenetranti. Partendo da $\lambda = 3$ mm., si arriva a $\lambda = 0{,}00034$ e il rapporto per questi limiti estremi risulta così di uno a 100 miliardi, cioè 10^{11}; od ancora, come si dice in acustica, si trattarebbe di un intervallo di 36 ottave. Questo si estenderebbe complessivamente a circa 60 ottave, se si prendessero

Digitized by Google

in considerazione anche le onde elettromagnetiche usate in radiotelegrafia, sino a circa 1000 metri: ma di queste ultime, di proposito non ci siamo voluti occupare.

Lo spirito umano può essere certamente soddisfatto per questa unicità di struttura di tante forme così svariate di energia raggiante; ma rimane forse perplesso nel considerare la varietà sterminata degli effetti che possono venir provocati dal trasmettersi delle varie vibrazioni attraverso il solo agente etereo; varietà dovuta solo ai differenti valori di λ.

A questa perplessità, si aggiunge ancora l'altra derivante dalla considerazione della seconda specie di radiazioni di cui abbiamo parlato: quella cioè di natura corpuscolare, e nella quale trovano posto i raggi catodici, anodici, *alfa*, e *beta*. Si può dire, che in questo secondo gruppo si hanno le prove più dirette dell'attendibilità dell'ipotesi corpuscolare; o meglio si ha addirittura la certezza che questa ipotesi sia la giusta, nei singoli casi studiati.

Ecco dunque una profonda differenza tra le maniere con cui il fisico comprende questi due differenti gruppi in cui si suddividono tutte le radiazioni conosciute. Mancando l'assoluta certezza della giustezza della concezione eterea, può ritenersi quindi, che, malgrado l'enorme progresso compiuto dalla scienza in conseguenza di tale concezione, non sia ancora detta l'ultima parola sulla vera natura e forse sulla reale esistenza del misterioso agente su cui essa si basa.

Da un recente libro di Millikan, prendiamo infatti talune delle seguenti considerazioni, che pongono in maggior luce tale questione.

Prima che si scoprisse l'elettrone, cioè sin verso la fine del secolo scorso, nessuna riserva poteva farsi sulla funzione dell'etere. Ma le difficoltà cominciarono, quando J. J. Thomson volle interpretare il seguente fatto: la luce ultravioletta, i raggi X, i raggi *gamma*, traversando uno spazio in cui siano compresi gli atomi materiali, strappano di tanto in tanto ad essi un elettrone negativo, che lanciano lontano con grande velocità. Non si comprende perchè tale distacco avvenga con la probabilità così piccola, come una volta su mille bilioni; e ciò, se realmente i raggi X consistono in onde. Altro fatto che mal si concilia con la teoria ondulatoria o con la elettrodinamica classica è quello che il citato fenomeno è indipendente dalla intensità delle radiazioni agenti.

Tutte queste difficoltà cadrebbero se fosse lecito estendere anche ai raggi X la teoria corpuscolare. Supponendo infatti che essi siano costituiti da particelle, basta ammettere che una di queste agisca, andando a urtare un atomo, per comprendere l'osservato effetto. Ma non è possibile, almeno per ora, abbandonare del tutto il concetto delle ondulazioni per spiegare le varie proprietà dei raggi in parola. E allora il Thomson ha da tempo avanzata l'idea che l'etere possa avere una speciale *struttura fibrosa*: lungo le fibre così resultanti, viaggerebbe l'energia elettromagnetica.

Questo è un primo passo verso la via del ritocco delle proprietà dell'etere; e mentre esso si compie fa la sua apparizione la teoria dei quanti di Plank a cui si è accennato; ed Einstein la estende poi ancora al fenomeno fotoelettrico. Secondo essa l'energia di un elettrone scacciato da una vibrazione luminosa, corrisponde esattamente alla quantità $h\nu$, il quanto luminoso, più il lavoro di estrazione dell'elettrone dall'atomo ed eventualmente anche dalla superficie del metallo. Più tardi Bohr (1913) emette un'ipotesi in cui ancora utilizza i quanti energetici di Planck, nel senso che un elettrone, saltando da un'orbita ad un'altra, dell'atomo a cui appartiene, emette energia luminosa sotto forma del quanto $h\nu$, eguale al dislivello d'energia delle orbite stesse. L'energia luminosa $h\nu$ non sarebbe allora emessa che a salti, ossia in maniera discontinua, inconciliabile con la teoria classica ondulatoria, per sè stessa di carattere eminentemente continuo. La relazione di Einstein sull'effetto fotoelettrico si può anche invertire ed allora spiega subito la produzione dei raggi X, per forte urto elettronico (raggi catodici) e quella di raggi visibili per urto elettronico lento (esperienze di Frank ed Hertz). Il principio di Bohr si estende poi all'assorbimento in luce visibile, all'emissione ed assorbimento dei raggi X caratteristici, donde sorge il suggestivo moderno sviluppo della spettroscopia.

Dalle numerosissime verifiche spettroscopiche e da molte altre esperienze in campi diversi eseguite da fisici di tutti i paesi, tra cui quelle delicate di Millikan per dimostrare la relazione di Einstein sull'effetto fotoelettrico, risulta la assoluta attendibilità di questa relazione e del principio di Bohr.

E allora si domanda come sia possibile accordare con la teoria ondulatoria dell'etere la detta emissione per quanti discreti di energia, che ha a prima vista le caratteristiche dell'emissione corpuscolare e che pur dovrebbe corrispondere alla energia raggiante luminosa. La risposta non può essere ancora formulata; ne è a dirsi che l'idea ormai vecchia della struttura fibrosa dell'etere emessa dal Thomson, possa essere facilmente accettata, come giustamente fa osservare il Millikan che al riguardo di tale controversia, così ad un certo punto conclude: « in sostanza ci troviamo nelle condizioni di aver costruito un edificio perfettissimo (quello della teoria ondulatoria dell'etere) e di averne tolto o rimosso le fondamenta (con la formulazione delle teorie dei quanti e di Bohr) senza che con ciò se ne sia provocata la caduta. Ciò essendo, debbono esistere dei punti di appoggio che per altro noi non vediamo. L'esperienza ha sorpassato la teoria o meglio, essa, guidata da una teoria inaccettabile, ha condotto alla scoperta di relazioni le cui ragioni ci sfuggono ancora ».

In questa incertezza, la numerosissima schiera di fisici di tutto il mondo, aiutata da mezzi sperimentali delicatissimi e costosi che spesso a noi in Italia mancano del tutto, si affanna a ritoccare le ardite teorie vecchie e nuove di cui si è fatto cenno; a ricercare fatti che finora ci erano sfuggiti e che possono gettare luce sull'assillante problema di una più minuta comprensione del fenomeno dell'energia raggiante.

Una volta era, costume del fisico di formulare nuove

Digitized by Google

ipotesi sol quando esse rispondessero a facili criteri ricavabili da semplici modelli, tratti da altri fatti conosciuti. Sostanzialmente, la concezione dell'etere cosmico o la teoria cinetica dei gas soddisfacevano a tale concetto. Nell'ultimo venticinquennio questo semplice criterio non è stato più rispettato. Senza parlare delle teorie relativistiche di Einstein, basta pensare a quelle di Planck o di Bohr e che per altro, sotto certi aspetti, alle prime si riannodano. Si enunciano in esse postulati che sono spesso in contrasto con le idee dominanti più comuni e da tali postulati si traggono conseguenze che sottoposte all'esperienza hanno dato talvolta brillanti conferme. Se il metodo sia lecito non discuto, certamente esso, oltre a dare lo spunto a nuove ricerche sperimentali, permette di aprire la via alla scoperta di fatti nuovi ed inaspettati; il che costituisce, senza alcun dubbio, il primo fattore del vero progresso scientifico.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. LIVIO CAMBI
ISTITUTO DI CHIMICA INDUSTRIALE DELLA R. UNIVERSITÀ DI MILANO

ELETTROCHIMICA
ASPETTI E PROBLEMI ATTUALI DELL' ELETTROLISI

Digitized by Google

Digitized by Google

La scoperta della pila apre l'era dell'elettrochimica. Nicholson e Carlisle, subito dopo la scoperta voltiana, decompongono l'acqua per elettrolisi: quasi contemporaneamente Cruickshank compie l'elettrolisi delle soluzioni saline.

La pila fornisce un nuovo, insperato mezzo d'analisi: permette a Davy (1806) la decomposizione di ossidi e sali, isolando metalli divinati dai chimici, ma non ottenibili per altre vie. Berzelius intraprende lo studio sistematico dell'elettrolisi dei corpi in soluzione, e perviene di poi alla teoria dualistica della opposta polarità dei componenti le molecole, precorritrice delle moderne teorie sull'intima struttura dei corpi.

Stabilite da Faraday (1832) le leggi delle reazioni agli elettrodi, il movimento di indagini elettrochimiche, iniziatosi con Volta, perveniva ai risultati definitivi nella seconda metà del secolo scorso. Le leggi delle soluzioni diluite, dedotte da Van t'Hoff, in base alla termodinamica ed alla legge d'Avogadro, inducevano Arrehnius nel 1887 al riconoscimento degli ioni, e più tardi portavano Nernst alla definizione del meccanismo osmotico della pila.

Se fondamentale è stata la scoperta del sommo Elettrologo italiano, non meno rilevante però è stata l'influenza delle scoperte dei nostri grandi elettrotecnici del secolo scorso, per l'affermarsi e l'estendersi delle industrie elettrochimiche, che solo furono possibili mercè lo sviluppo delle industrie elettriche.

Nel centenario di Volta il chimico italiano che s'accinga a considerare l'Elettrochimica, nei suoi problemi ed applicazioni attuali, sente la grandezza delle tradizioni nazionali, sente che tale scienza e tecnologia si trovano nel nostro Paese in un ambiente naturale.

Notevoli sono stati i contributi degli italiani allo sviluppo delle applicazioni dell'elettrochimica, sia nel campo dell'elettrolisi, che in quello elettrotermico.

Marchese (1885) è tra i pionieri dell'idroelettrometallurgia. Il suo processo di estrazione del rame servì di base a molteplici prove indistriali ripetutesi fino a questi ultimi anni.

Garuti (1890) è fra i primi ideatori degli apparecchi per idrogeno ed ossigeno ed il suo diaframma metallico ha suggerito alcuni dei più recenti e perfetti dispositivi.

Siamo stati all'avanguardia nell'adottare i processi elettrolitici per soda e cloro: nella officine di Brescia e di Bussi si è compiuta una delle maggiori esperienze industriali in proposito.

Da noi sorse in Foligno (1898) uno dei primi impianti per carburo di calcio. La vecchia e scomparsa fabbrica di Foligno fu una scuola da cui uscirono non pochi dei nostri termo-elettrotecnici, degni del confronto con i maggiori stranieri. Vennero in essa elaborati i metodi italiani per la preparazione deldell'ossido di bario, del solfuro di bario e del solfuro di sodio che ora sono applicati all'estero.

A Piano d'Orte (1904) si sperimenta il primo grande impianto per la calciocianamide, dovuto alla scoperta di Frank e Caro, ma al cui sviluppo contribuirono attivamente i nostri tecnici. Dall'Italia si è diffusa nel mondo l'industria del primo concimante azotato sintetico.

Stassano (1898) è tra i fondatori della elettrosiderurgia. Se la riduzione del minerale al forno elettrico trova in lui il primo assertore, l'affinamento dell'acciaio per via elettrotermica ebbe in lui l'iniziatore tenace, che perseverò con sicura fede, contro ogni difficoltà ed insuccesso iniziale.

Nel periodo post-bellico si mantiene ininterrotta, fervida, la nostra attività nel campo delle industrie elettrochimiche.

Dal processo della soda al mercurio deriva la geniale applicazione alla preparazione della benzidina con l'amalgama elettrolitica, dovuta a Gualtiero Poma, troppo presto rapito all'affetto del Colleghi ed alla chimica italiana.

Il cloro elettrolitico suggerisce a Cataldi il metodo per l'estrazione della cellulosa che Umberto Pomilio genialmente perfeziona ed applica allo sparto ed alla paglia.

La nostra deficienza di combustibili doveva indurre a ricercare nel metodo elettrolitico la soluzione di altri vasti problemi nazionali.

Il problema dell'ammoniaca sintetica veniva da noi risolto con l'idrogeno elettrolitico. I nomi di Casale e di Fauser sono legati ai processi sintetici che in Italia ebbero ed hanno sviluppo mercè l'elettrolisi dell'acqua, e che si sono propagati all'estero.

Nel campo metallurgico moventi analoghi determinarono il sorgere dell'industria dello zinco elettrolitico, basata su processo italiano, studiato in modo affatto indipendente da quelli stranieri. Tale processo ha trovato il suo campo più fertile nel trattamento delle calamine povere di Sardegna, di cui

Digitized by Google

abbiamo vaste disponibilità e che vennero così valorizzate poichè sono unicamente sfruttabili per metallo col metodo elettrolitico.

Abbiamo ora in pieno sviluppo industriale il processo di Alberto Blanc che risolve il duplice problema della produzione dei sali potassici e dell'allumina dalle leuciti, destinata all'industria dell'alluminio.

Tale, in rapida corsa, il quadro delle nostre opere nell'elettrochimica. Chi scrive sa di tacere per brevità molte iniziative pure benemerite; è però testimonio delle aspre difficoltà incontrate e superate. Tanto le iniziative non peranco affermatesi quanto le imprese vittoriose sono degne delle nostre grandi tradizioni.

* * *

LE GRANDI APPLICAZIONI DELL' ELETTROLISI

Nel periodo che va dal 1885 al 1900, anche per l'impulso delle grandi applicazioni dell'elettrotecnica che le resero possibili, sorsero le industrie elettrochimiche. In questa epoca è tutto un fervore di ricerche, di brevetti riguardanti i processi elettrochimici. Ad alcuni chimici parve che tutti i problemi della chimica potessero risolversi con l'elettricità.

Dei molti tentativi che si ebbero in tale periodo eroico dell'elettrochimica, la pratica, con le sue necessità economiche, ridusse le possibilità ad un numero alquanto limitato di processi.

Non tutti i chimici però hanno ancora perduto la mentalità miracolista in fatto di applicazioni dell'elettrochimica. Si crede di frequente che il metodo elettrolitico sia sempre il più conveniente, e che, qualora un processo chimico si possa compiere con l'energia elettrica sia sempre industrialmente possibile.

Altro punto su cui spesso non si pondera a sufficienza, discutendo di industrie elettrochimiche, è che il consumo di energia rappresenta un fattore importante sì, ma non mai decisivo, entro certi limiti; giacchè in molte di tali industrie gli altri coefficienti di costo, quali quelli derivanti dall'attrezzatura e dalla manutenzione degli apparecchi elettrolitici, dalle operazioni sussidiarie, hanno un'influenza maggiore di quella derivante dal consumo dell'energia.

Caratteristico per questo lato è stato lo sviluppo moderno delle industrie elettrochimiche.

Le applicazioni alla chimica organica, per le quali tante speranze si erano concepite e brillanti lavori scientifici si erano compiuti, nonostante alcuni seri tentativi su scala industriale per la preparazione della benzidina, del paramidofenolo, per l'ossidazione dei cresoli, sono completamente fallite. In questo campo i processi puramente chimici sono stati rapidamente riconosciuti di gran lunga più economici per la loro maggiore semplicità e sicurezza di funzionamento.

Per contro, l'elettrolisi ha avuto sviluppo imponente nel campo della metallurgia e della chimica inorganica, dove ha trovato un proprio e caratteristico campo d'azione.

Le grandi applicazioni odierne dell'elettrolisi sono appunto quelle riguardanti l'ottenimento e l'affinazione di alcuni metalli; i processi elettrolitici per alcali caustici e cloro; la preparazione dell'idrogeno e quella dell'ossigeno che l'accompagna. Fra le minori abbiamo le industrie degli ipocloriti e clorati, ormai sussidiarie a quelle degli alcali caustici; la preparazione dei persali e perossidi elettrolitici che, per quanto pregevoli, rappresentano sempre installazioni e potenze modeste. Nel campo delle industrie di chimica organica, e precisamente in quelle dei coloranti, l'elettrolisi si limita a produrre reagenti, quali il cloro, e l'acido cromico rigenerato in soluzione dai sali cromici.

L'epoca moderna è caratterizzata, assai più che dalla scoperta di nuovi procedimenti, dal perfezionamento e dalla concomitante estensione in potenza dei processi già noti. Allo sviluppo delle industrie elettrolitiche concorrono tutti i fattori attuali: il perfezionarsi e l'accrescersi degli impianti elettrici, lo sviluppo della meccanica che offre un complesso di mezzi atti a rendere sempre più accentuato l'automatismo delle operazioni sussidiarie a quella d'elettrolisi, che in alcuni casi predominano su di essa per mole d'impianti e per costo d'operazioni. Particolarmente nel campo idroelettrometallurgico alcune industrie non sarebbero possibili senza la perfezione moderna degli impianti chimici e meccanici.

Ci soffermeremo principalmente sui processi aventi caratteri di novità od aventi attinenze con i problemi nazionali.

* * *

L' ELETTROLISI DEGLI ELETTROLITI FUSI

L'elettrolisi degli elettroliti fusi è applicata all'ottenimento dei metalli fortemente elettroaffini; principalmente dell'alluminio, del magnesio e del sodio.

In questo campo l'elettrometallurgia non ha processi che possano competerle giacchè, da Davy a noi, nessun altro metodo più economico possediamo per produrre i metalli predetti. L'affinamento stesso che oggi si tenta per l'alluminio deve basarsi sul metodo elettrolitico.

Il sodio conserva sempre la sua notevole importanza per l'industria chimica e sono attive le ricerche e le applicazioni di nuovi metodi, particolarmente di quelli d'elettrolisi del cloruro fuso, ma rappresenta un'industria di mole relativamente ridotta. L'alluminio anzitutti, il magnesio poi, occupano un posto sempre più ragguardevole nella metallurgia moderna. Dal magnesio derivano quelle leghe o metalli leggeri che hanno sicuramente un grande avvenire.

L'alluminio.

Fissato il metodo di preparazione col tipo del classico Forno Héroult-Hall, col bagno ben noto di fluoruri, la metallurgia dell'alluminio presenta due problemi concomitanti: l'ottenimento dell'allumina necessaria per l'elettrolisi; la produzione del me-

Digitized by Google

tallo ad alto grado di purezza, superiore al 99,5 %. È nota la preparazione dell'allumina dalle bauxiti col metodo Bayer, per trattamento con liscive di soda caustica. Questo processo richiede, oltre i complessi impianti, tipici dei trattamenti dei minerali per via umida, un elevato dispendio termico: circa 1 Kg. di carbone per 1 Kg. d'allumina con alcune bauxiti; implica inoltre perdita di soda per la formazione di silico-alluminato sodico insolubile e trattenuto dalla ganga ferrifera inutilizzabile. Il tentativo di impiegare altri materiali alluminosi (caolino, argille) con trattamenti acidi, che permettano la solubilizzazione dell'allumina, è stato ripetuto più volte. Non poteva avere successo senza ricorrere a silicoalluminati che nel contempo fornissero dei sottoprodotti più pregevoli della silice. Ciò è stato resso possibile col processo italiano di Alberto Blanc che è stato applicato alle nostre leuciti, in base ad un originale procedimento di concentrazione del minerale per via magnetica. La leucite fornisce insieme all'allumina, sali potassici, e, come residuo, la silice. Il procedimento, che è stato già illustrato altrove, è in piena attuazione.

Si erano concepite grandi speranze, alcuni anni or sono, col processo Serpek, concorrente ai processi per via umida, col quale in un forno a resistenza (a temperature che potrebbero limitarsi a 1300°) si compie una riduzione dell'allumina, in presenza di azoto, con formazione di azoturo d'alluminio, facilmente decomponibile in allumina idrata ed ammoniaca. Per l'alta temperatura e l'atmosfera riducente, il silicio ed il ferro si separano allo stato ridotto. Il problema è interessante nel suo duplice scopo: l'ottenimento dell'allumina pura e dell'ammoniaca, in rapporti molecolari. Finora i tentativi hanno urtato nelle grandi difficoltà tecniche dell'applicazione.

Col metodo elettrotermico è sorto anche il recente processo Haglund. Questi tratta la bauxite al forno elettrico, analogamente a quanto si opera per il corindone artificiale per smeriglio (*alundum*), ma con aggiunta di solfuro di ferro, pirrotite o pirite. Il solfuro di ferro, nel mezzo riducente, genera ferro metallico, che si lega al silicio della silice presente e solfuro d'alluminio

$$3\,FeSAl_2O_3 + 3\,C = 3\,Fe + 3\,CO + Al_2S_3$$

che riduce la viscosità della massa e la rende più fusibile.

Queste condizioni permetterebbero una perfetta separazione della lega metallica dalla scoria, dalla quale con acqua, dopo idrolisi del solfuro d'alluminio, e recupero del solfo, si otterrebbe allumina pura.

I dati offerti su questo procedimento sono: per 1 tonn. di allumina Kg. 400 di coke, Kg. 35 d'elettrodo, 4500 kWh: per una bauxite tipica, il costo per tonn. di allumina sarebbe di circa 216 Mk. oro, non computando il recupero del solfo, contro 273 del processo Bayer. Dato che per 1 Kg. di metallo occorrono circa 2 kg. di allumina, al consumo ordinario per l'elettrolisi di circa 35 kWh dobbiamo aggiungere 9 kWh per 1 Kg. di alluminio.

La quistione non sembra ancora tecnicamente decisa: sono in corso all'Estero esperienze su vasta scala.

Per le condizioni nazionali occorrerà stabilire se questo metodo si adatta alla nostre bauxiti, ricche di ferro, e se la lega ferrosa ottenibile come sottoprodotto ha valore per la siderurgia. Il forno elettrico è giudicato di frequente uno strumento semplice, e tali sono in genere molti trattamenti che in esso si compiono, ma il giudizio sul costo di un'operazione elettrotermica non può provenire che da una adeguata prova industriale, che sola può fornire tutti i dati per una esatta valutazione economica.

Il tecnico italiano deve certo tenere presenti e seguire questi nuovi metodi per la bauxite, ma non può trascurare ancora il vecchio processo alcalino Bayer che è possibile di notevoli perfezionamenti meccanici e che offre garanzia di una produzione del tipo voluto.

L'altro problema attuale della metallurgia dell'alluminio riguarda il metallo finito. È ben noto che le sue proprietà sono molto influenzate dalle impurezze. Alcune leghe di alluminio come i *duralluminium* presentano col tempo fenomeni di scadimento dovuti alle impurità del metallo impiegato. La massima purezza raggiungibile direttamente, col processo termo-elettrolitico, è del 99 % circa. Normalmente si producono tipi meno puri. Fin dal 1900 W. Hooples aveva proposto la raffinazione elettrolitica dell'alluminio, elettrolizzando in un bagno fuso di fluoruri il metallo grezzo. Il processo è stato ripreso in questi ultimi anni e nel 1925 ci è giunta notizia di un grande esperimento industriale, compiuto negli S. U. A. con forni alimentati con 20.000 Amps. a 6 Volt. All'anodo si usa una lega di alluminio e rame, più pesante del bagno costituito da criolite, fluoruro di alluminio e di bario, il metallo puro galleggia attorno al catodo ed è protetto da una crosta di allumina; esso è stato ottenuto al 99,80 %. Le sue proprietà meccaniche differiscono notevolmente da quelle dell'alluminio ordinario: risulta notevolmente accresciuta anche la resistenza agli acidi.

L'importanza del prodotto raffinato è in rapporto sopratutto alle proprietà delle leghe ottenibili, sulle quali manchiamo ancora di notizie. Per il lato economico il giudizio deve essere comunque cauto: abbiamo per 1 Kg. di raffinato non meno di 20 kWh consumati, che aggiunti a quelli necessari alla preparazione iniziale danno circa 55 kWh per Kg.; dovrà computarsi poi il costo delle materie per l'affinamento, dei materiali accessori, delle operazioni.

Non possiamo però escludere che il raffinamento sia conveniente, in alcuni casi, ed è problema che deve essere anche da noi attentamente seguito: potrebbe darci un prodotto ricercato in un prossimo avvenire per leghe di alto pregio. Nelle applicazioni dell'alluminio abbiamo avuto in questi ultimi anni risultati inaspettati, basti ricordare: la lega col silicio (12 % Si), *Silumin* o *Alpax*, le cui pregevoli proprietà meccaniche, dovute alla sua struttura, si conseguono per fusione con fluoruri o per aggiunte di piccole quantità di sodio; lo *Schleron* lega l'alluminio contenente circa il 0,2 % di litio.

Digitized by Google

L'aumento della produzione del metallo attesta il diffondersi del suo uso.

La produzione mondiale dell'alluminio è passata da 64.800 tonn. del 1913 a 170.000 del 1924: la produzione europea in tale periodo è salita da 36.400 tonn. a 68.000 e quella americana da 28.400 a 102.000.

L'incremento della produzione dell'alluminio è legato allo sviluppo delle disponibilità di energia a prezzo conveniente. L'Italia si appresta, per opera della « Montecatini » ad aumentarne la produzione di 6.000 tonn. con gli impianti di Mori e di Nervesa.

Magnesio.

Il magnesio è il metallo leggero che presenta grandi promesse per l'avvenire. In Italia, per impulso di S. E. il Ministro On. Belluzzo, si è già imposto il problema della sua produzione nazionale.

La preparazione del metallo non può essere economicamente compiuta che per via elettrolitica. Il metodo antico, che è ancora quello più generalmente impiegato nell'industria, è basato sull'elettrolisi di miscele fuse di cloruro di magnesio e di cloruro di potassio o di sodio. In Germania, dove è sorta l'industria, si impiega la miscela potassica. La miscela con cloruro di sodio sarebbe certamente più conveniente per le condizioni italiane. Con questi metodi i rendimenti pratici si aggirano su un consumo di circa 32 kWh pr 1 Kg. di metallo, con una tensione alle celle di 6/8 Volt.

Si è descritto in questi ultimi anni (1922-24) un processo della Magnesium Co. per elettrolisi del cloruro usando una cella divisa in due comparti; nell'uno si formerebbe una lega di magnesio con catodo di piombo fuso, nell'altro dalla lega si otterrebbe il metallo puro con una elettrolisi successiva. Il piombo circolerebbe in modo continuo nei due comparti. Il consumo di energia scenderebbe ai 18-20 kWh per Kg. prodotto.

È stata proposta in questo, come in altri processi al cloruro, l'utilizzazione del cloro, per produrre cloruro di magnesio e clorato, facendolo agire sulla magnesia sospesa in acqua.

Il processo inglese cui accenno è certamente ingegnoso, ma, nonostante gli alti rendimenti dichiarati rispetto all'energia, la complessità della cella e del suo funzionamento induce ad attendere il risultato dell'esperienza, prima di condividere i giudizi favorevoli che si sono già espressi.

Punto economicamente di grande rilievo per l'ottenimento del metallo per la via del cloruro è quello della preparazione della miscela di sali per l'elettrolisi. Il cloruro di magnesio, ottenuto da soluzioni del sale, deve essere disidratato a temperatura relativamente elevata. La deacquificazione è accompagnata da una idrolisi notevole del sale, che si scinde generando prodotti basici poco solubili nel bagno sodico o potassico, la cui temperatura non deve superare i 750°. Per produrre cloruro di magnesio, o sue miscele, della composizione voluta, occorre fare agire su esse l'acido cloridrico gassoso a temperatura adeguata. L'operazione può essere condotta su scala relativamente vasta in forni a funzionamento continuo, ma resta sempre nel suo complesso delicata e costosa. Deve computarsi il non indifferente dispendio della deacquificazione di circa 11 Kg. di cloruro di magnesio idrato commerciale ($MgCl_2$ 6 H_2O) per produrre 1 Kg. di metallo.

Questi dati vengono prospettati per porre il problema economico della produzione nazionale del magnesio dal cloruro: se cioè convenga partire dal cloruro di magnesio cristallizzato quale potremo ricavare dalle acque madri delle nostre saline o non convenga clorurare carbonato od ossido di magnesio sufficientemente puri.

Ma, giunti a questo punto, dobbiamo esaminare, in concorrenza al vecchio processo a cloruro, il nuovo basato sull'impiego di fluoruri, studiato recentemente su scala industriale da W. G. Harvey in America.

Questo nuovo metodo è analogo a quello dell'alluminio. L'ossido di magnesio può essere elettrolizzato in una miscela fusa di fluoruro di magnesio e di fluoruri alcalini ed alcalino terrosi. Harvey impiega fluoruro di sodio e di bario, con circa il 50 % di fluoruro di magnesio. L'elettrolisi presenta una difficoltà rispetto a quella per l'alluminio: l'ossido di magnesio ha una solubilità molto piccola, di circa il 0,15 %, a 950°, rispetto al 25 % dell'allumina nel proprio bagno. Alle celle si ha una maggiore tensione che va dai 9 a 16 Volt, data non solo dal più elevato potenziale di decomposizione dell'ossido, ma anche dalla sua bassa solubilità.

Dai dati finora noti il consumo di energia sale a 50-60 kWh per 1 Kg. di metallo; è più elevato dal 70% al 100 % di quello del cloruro. Ma di contro stanno sicuramente i seguenti pregi: l'impiego di un elettrolito non igroscopico e l'eliminazione dell'operazione costosa della disidratazione o comunque della preparazione del bagno a cloruro; la possibilità di una quasi continuità dell'elettrolisi, con forni ad alta potenza che eliminano ogni riscaldamento esterno sussidiario.

Il processo implica l'uso di ossido di magnesio puro: cioè si deve ricorrere a magnesiti naturali ad elevato grado di purezza, oppure ad una preparazione dell'ossido da materiali magnesiferi impuri.

Il nuovo metodo merita tutta l'attenzione dei tecnici italiani: il problema nazionale deve essere esaminato dal lato della disponibilità della materia prima a prezzo conveniente e del costo dell'energia.

Occorrono magnesiti ad alta purezza che per calcinazione diretta possano dare ossido adatto alla elettrolisi. Le stesse magnesiti dell'Eubea, da noi largamente importate per altri usi, non sono probabilmente, come tali, sufficientemente pure. Occorrerebbe disporre di un processo di preparazione di ossido puro dai minerali magnesiferi di cui disponiamo, oppure dalla decomposizione del cloruro di magnesio dalle acque madri delle saline.

Il problema del magnesio è allo studio sulle linee che vengono tracciate: di esso si occupa anche chi scrive queste righe e confida in una soluzione nazionale.

Digitized by Google

Non è possibile valutare la produzione mondiale odierna del magnesio. La parte più cospicua è tuttora data dalla Germania che ne produrrebbe circa 900 tonn. annue. Il prezzo attuale è in notevole decrescenza sugli anni scorsi: sul mercato americano è di circa dollari 1,75, contro 2,75 per Kg. del 1921-24. Se i bassi prezzi si manterranno il consumo dovrà certamente accrescersi. L'importazione in Italia è stata giudicata di circa 30 tonn. annue.

L'impulso maggiore al consumo attuale del magnesio è venuto dall'impiego delle leghe leggiere, studiate e messe in commercio dapprima dalla « Griesheim » sotto il nome di *Electron*, contenenti in media il 96 % di Magnesio.

Le speranze che si erano concepite nell'immediato dopo guerra, di una rapida diffusione e di un largo consumo, non si sono in realtà verificate completamente; ma l'accrescersi e l'estendersi del consumo stesso è continuo, per la leggerezza, per le proprietà meccaniche, che anche i pezzi trafilati o stampati conservano, per la facilità con cui si lavorano i getti.

Lo studio delle leghe di magnesio e delle loro applicazioni è tuttora proseguito attivamente e certamente si raggiungeranno nuovi ed utili risultati. Giova ricordare che la metallurgia di questi metalli è sul nascere e che sono possibili sviluppi imprevisti.

* * *

L'IDROELETTROMETALLURGIA

Le applicazioni metallurgiche dell'elettrolisi riguardano principalmente l'estrazione o l'affinamento del rame, dello zinco, del ferro, del piombo, dello stagno, dei metalli preziosi.

Il processo elettrolitico in questo campo è sorto, in generale, in competizione ai processi termici; non si è sviluppato però sostituendosi ad essi, ma lateralmente, in una propria sfera d'azione, per la particolarità dei casi cui s'applica più vantaggiosamente. Esso è vincolato ai materiali da trattare, ai prodotti conseguibili, alle disponibilità e prezzi dell'energia determinanti l'economia dell'applicazione.

Il fiorente sviluppo di questo ramo è l'effetto dello straordinario fabbisogno e consumo moderno dei metalli, che hanno indotto a sviluppare processi in genere noti per via teorica, a trattare minerali, a raffinare metalli per conseguire rendimenti e risultati che mettono in particolare valore il procedimento dell'elettrolisi.

Nell'idroelettrometallurgia si verificano più che nelle altre applicazioni elettrochimiche le condizioni cui ho accennato da principio: l'elettrolisi è una delle operazioni del diagramma di lavoro, nel quale ha importanza non soltanto la condotta dell'elettrolisi stessa, ma anche, e talvolta più, il resto delle operazioni chimiche e meccaniche. Quando si discute di questi impianti le cifre riguardanti il consumo d'energia hanno sempre un valore relativo: il giudizio economico non può trarsi che dall'esame complessivo del ciclo di lavoraizone.

Il rame.

La raffinazione del rame è rimasta nelle linee ormai classiche dei diversi tipi d'impianto, con i trattamenti relativi delle soluzioni, dei residui anodici, ben noti, pur essendosi avvantaggiata dei progressi moderni dell'elettrotecnica e della tecnologia chimica.

L'America ha sempre il suo grande primato: dal 1914 al 1927 si ha un incremento del 57 % della produzione che nel '24 ha toccato i 2800 milioni di libbre. La sola raffineria Guggenheimer di Baltimora ha prodotto 330.000 tonn. annue.

La tendenza attuale è l'accentramento in grandiosi impianti, con la scomparsa dei minori. Il costo dell'energia, pur essendo il suo consumo assai limitato, (Kg. 3,6 per 1 kWh) ha notevole influenza in questo caso e le grandi raffinerie si sono preoccupate della produzione dell'energia, con grandiosi impianti idroelettrici, e del perfezionamento degli impianti a corrente continua in cui si sono molto diffusi i grandi convertitori rotativi, con intensità non inferiori ai 10.000 Ampère.

Il recupero dei metalli preziosi è, come è noto, uno dei lati più importanti del rendimento economico degli impianti. Nella sezione della zecca americana di Filadelfia si raffinano per via elettrolitica 200 Kg. giorno di oro proveniente da residui anodici delle raffinerie.

Scarse sono invece le possibilità di sviluppo della raffinazione per il recupero del rame da rottami e da residui di leghe. In Germania durante la guerra sorse un grande impianto per la raffinazione del rame, ottenuto dai residui d'ottone, previa eliminazione dello zinco per ossidazione in convertitori. Ivi pure sorsero impianti per il ricupero dello stagno dal bronzo. Anche in Italia si è tentato lo stesso trattamento di rottami di bronzo con recupero del rame e dello stagno. Questi processi si adattano naturalmente solo a situazioni particolari.

Maggiore attenzione dobbiamo rivolgere ai processi di estrazione elettrolitica del rame dai minerali, per l'attinenza che possono avere con lo sviluppo nazionale della metallurgia del rame, per il trattamento di alcuni nostri minerali, particolarmente della Sardegna.

L'idrometallurgia del rame è complessa e, per quanto studiata da antica data, ha avuto applicazioni recenti. Ogni minerale presenta un problema proprio: non può parlarsi di metodi generali. I due più grandi impianti sono quello della Chile Copper Co. a Chuquicamata nel Chile, alimentato dalla centrale di Tocopilla; quello della New Cornelia Copper Co. ad Ajo, Arizona. A questi si aggiunga l'impianto sperimentale della Unione Miniere dell'Alto Katanga, nel Congo Belga, alimentato con l'energia delle centrale di Panda.

Al Cile si sfrutta un vasto giacimento coutenente della *brocantite*, solfato basico di rame con un tenore di rame medio dell'1,9%. Il minerale è particolarmente puro da impurezze metalliche: dall'elettrolisi delle soluzioni si ottiene rame ad un grado assai elevato di purezza, analogo a quello delle

Digitized by Google

raffinerie. L'attacco del minerale è fatto per percolazione in grandi vasche d'attacco (45×34×5,3 m.): non si ha consumo di acido, eccedendo nel ciclo elettrolitico l'acido contenuto nel minerale. La maggiore difficoltà è stata data dai tenori di cloro e di acido nitrico del minerale che concorrono ad una rapida disgregazione degli anodi di piombo perossidato, solitamente usati. Il cloro viene separato in larga parte dalle soluzioni, che contengono 14,2 gr. di rame per litro, mediante trattamento con cemento di rame, in forma di cloruro rameoso, dal quale si recupera poi il metallo per cementazione. Pur con questa purificazione, il contenuto di acido nitrico ha condotto all'adozione di anodi di una lega di silicio-rame-ferro (detta *Chilex*) che presenta sufficiente resistenza alla disgregazione.

L'installazione ha una potenza di 28.000 kW a corrente continua; la produzione non è inferiore alle 150 tonn. giorno di metallo. La grande vastità del giacimento, la natura del minerale, l'elevata produzione costituiscono la base economica dell'impianto, assai più dei brillanti accorgimenti chimici ed elettrochimici adottati.

Nell'impianto di Ajo si trattano pure minerali misti parzialmente ossidati. Si ha qui il problema della presenza del ferro che, come è ben noto, complica il processo d'elettrolisi. Si usa an. solforosa, per ridurre il ferro ferrico a ferroso, ed anodi di piombo perossidati non avendosi nè cloro, nè acido nitrico. Si otterrebbero 0,390 Kg. di rame per 1 kWh. Abbiamo scarsi dati su questa officina.

Un grande esperimento molto interessante si sta compiendo nell'Alto Katanga. È noto che quivi si sta sfruttando uno dei più grandi giacimenti di rame del mondo. Si tratta di ammassi ed impregnazioni che hanno dal 15 % al 3,5 % di rame sotto forma di ossidi, carbonati, silicati idrati. Nel 1924 si sono estratte 80.000 tonn. di metallo come minerale, pari a 230 tonn. giorno. Il processo elettrolitico è stato studiato per il trattamento del minerale più povero. Una delle difficoltà economiche è data dalla necessità dell'acido solforico che viene prodotto da solfo importato, non essendosi ancora trovata pirite nella regione. Non abbiamo molti ragguagli sul procedimento, ma deve essere analogo a quello di Chuquicamata, con il vantaggio dell'assenza di cloro e d'acido nitrico. Le soluzioni risultano alquanto concentrate in rame (35 gr. per litro); il ferro raggiunge i 5 gr. per litro; si produrrebbero Kg. 0,500 per kWh. Nel 1924 è giunta notizia che l'impianto elettrolitico sarebbe stato portato alla potenza di 30.000 tonn. di metallo annue.

L'elettrolisi per l'estrazione del rame ha avuto cioè finora grandi applicazioni soltanto con i minerali ossidati, a basso tenore di rame, in casi in cui le condizioni sono particolarmente favorevoli per la natura del minerale.

I trattamenti elettrolitici dei minerali solforati poveri in rame e ferriferi sono fra i più antichi: risalgono al 1885. A tutti è noto il processo Marchese e quello posteriore della Siemens e Halscke che approfittava del solfato ferrico formatosi nel comparto anodico per spingere l'attacco del minerale, agendo sul solfuro di rame come ossidante. Tossizza applicò poi l'an. solforosa per ridurre il solfato ferrico formatosi all'anodo. Addicks nel 1915 studiò attentamente l'elettrolisi dei sali di rame in presenza dei sali di ferro con anodi di carbone. Sono dell'anno scorso le notizie pervenuteci su un esperimento notevole compiuto nel 1923 dalla Inspiration Consilated Cooper Co., in cui vennero usati anodi di grafite ed il solfato ferrico come reagente per solubilizzare il rame del solfuro presente nel minerale. Tutti questi studi ed esprimenti ad un attento esame economico non recano però ancora elementi decisivi per l'applicazione, almeno dei processi esposti, ai casi nostri, cioè alle nostre piriti cuprifere.

Rappresentano questi metodi una delle possibilità nazionali, ma occorre tener presente che nel rame l'elettrolisi può avere concorrenti i processi di cementazione, sia col ferro che con l'anidride solforosa sotto pressione. È prematuro pronunciarsi sul metodo di separazione del rame, allo stadio attuale degli studi riguardanti i nostri minerali, fra i quali, per importanza, dobbiamo notare quelli di Cala Bona presso Alghero in Sardegna, con un tenore medio del 4 % di rame.

Zinco.

La raffinazione elettrolitica dello zinco prodotto col vecchio processo termico di distillazione, usando soluzioni di solfato di zinco, è processo da laboratorio, non ha alcuna importanza economica, per la tenue differenza di prezzo fra metallo grezzo e raffinato, per il poco valore dei metalli dei residui anodici. L'elettrometallurgia dello zinco si è sviluppata unicamente per l'ottenimento dello zinco da alcuni minerali adatti.

Sono sorti dapprima (1915-18) numerosi impianti di prova, col metodo elettrolitico e di lisciviazione dei minerali con soluzioni di acido solforico, che si sono poi ridotti a poche grandi officine trovantesi in condizioni favorevoli al procedimento. I più grandi impianti attuali superano in potenza le più grandi Fonderie esistenti col metodo antico, termico, belga silesiano. Abbiamo il grande impianto di Great Falls della Anaconda Copper Co. di 150 tonn. giorno di metallo; della Consolidated Mining Smelting Co. nel Canadà presso Trail di circa 140 tonn. giorno; della Electrolytic Zinc Works di Risdon in Tasmania di pari potenza. Per l'Europa i primi impianti sorsero in Italia, subito dopo quelli americani. Al primo impianto per blende di S. Dalmazzo di Tenda, della potenza di circa 10 tonn. giorno di metallo, ha fatto seguito il notevole impianto di Monteponi in Sardegna, della Società omonima, che tratta calamine povere e che ha la potenza di 5000 tonn. annue di metallo. Sta ora sorgendo un terzo impianto per conto della Società francese Penarroya che impiegherà a Cotrone le blende delle miniere sarde di Gennamari e Ingurtosu ed avrà la capacità di 7000 tonn. annue.

In Francia si ha ora l'impianto sperimentale di Viviez della Vielle Montagne.

Nel 1924 il 14 % della produzione mondiale dello

Digitized by Google

zinco è stata coperta dal metodo elettrolitico per circa 135.000 tonn.

Il metodo elettrolitico cui accenniamo, pur sviluppandosi in quelle località dove concorrono elementi economici favorevoli, va gradatamente espandendosi, mentre i processi al forno elettrico per zinco hanno subito un arresto.

Il processo elettrolitico si applica principalmente a due gruppi distinti di minerali: blende contenenti piombo e calamine povere di tipo adatto.

Hanno particolare importanza nel primo caso i concentrati per flottazione. Per le blende cui accenniamo il processo elettrolitico permette il recupero dello zinco e del piombo, in generale contenente argento, con rendimenti che non sono raggiungibili per la via termica. Gli impianti di Trail e di Risdon sopra citati sorsero appunto per il trattamento di solfuri misti di zinco e piombo.

Nel trattamento elettrolitico delle blende ha grande importanza l'arrostimento del materiale che è compiuto con forni meccanici di diverso tipo. L'operazione è delicata perchè occorre rimanere a temperature piuttosto basse, intorno ai 700°, per ottenere una cenere adatta alle liscivazioni; in queste condizioni l'arrostimento non può mai essere spinto; in alcune blende si limita all'85 %-90 %. Ciò implica un recupero della frazione rimasta « cruda » dai residui della lisciviazione: recupero che, oltre quello del piombo dei residui stessi, impone il diagramma del trattamento umido. La preparazione della soluzione di solfato di zinco (che ha un tenore da 60 gr. a 100 gr. di metallo nel litro) è fatta in due tempi: in un primo la lisciviazione si arresta ad una soluzione acida dalla quale si ricava un fango esaurito, atto ad essere sottoposto alla flottazione per estrarne le frazioni di minerale non arrostito. Dalla flottazione si ha un residuo adatto al trattamento per piombo e argento. In un secondo tempo la soluzione è neutralizzata o con un eccesso di blenda o con calcare, per depurarla dal ferro, dall'arsenico e antimonio. Subisce poi accurate depurazioni per cadmio, rame, cobalto, nichel. La depurazione costituisce dopo la lisciviazione l'operazione più importante del processo.

Il trattamento dell'altro gruppo di minerali cui venne accennato, le calamine povere, è opera esclusivamente italiana, svolta da chi scrive e dai dirigenti della Società Miniere di Monteponi. Il processo elettrolitico è stato da noi diretto alle calamine al 20-25% di zinco, sotto forma di carbonato, aventi poca silice e contenenti limonite ($Fe_2O_3 = 43/45\%$). Tipica per questi minerali è la Miniera di Campo Pisano (Iglesias) che presenta notevolissime quantità di tale calamina ferrifera.

Il minerale in parola non si può concentrare: deve essere lavorato come tale.

Non è economicamente possibile trattarlo col metodo della distillazione, e si presta ottimamente alla lisciviazione solforica a crudo, senza preventiva calcinazione.

L'importanza dell'applicazione del metodo elettrolitico è di avere permesso cioè di mettere in valore importanti giacimenti nazionali, di minerale zincifero, che sarebbero rimasti inutilizzati per l'estrazione del metallo. Naturalmente si sono elaborati metodi e diagrammi di lavoro adeguati al minerale ed alle condizioni locali. L'impianto di Monteponi studiato e progettato da chi scrive, entrato in marcia ai primi dell'anno scorso, ha confermato gli alti rendimenti della lisciviazione, non inferiori all'80 % dello zinco totale: risultato notevole se si riflette al basso titolo del minerale. Il consumo dell'energia per la elettrolisi è risultato nei limiti verificati altrove.

La calamina di Campo Pisano ha presentato problemi chimici di grande interesse: essa contiene come impurità molto nociva il nichel in tenore tale da corrispondere a circa gr. 0,015 per litro di elettrolito. Da autorevoli tecnici stranieri specialisti si disse che il metodo elettrolitico non era perciò applicabile. Il nichel è un' impurità fortemente nociva alla deposizione dello zinco e si riteneva impossibile ottenere rendimenti dell'elettrolisi convenienti, con tenori relativamente così elevati di questo metallo. Un'opportuna regolazione dell' elettrolisi ha permesso di superare questa difficoltà. Certo, sono in continuo studio da noi ed all'estero i metodi di depurazione delle soluzioni zincifere che permettono di elevare i rendimenti di corrente; così pure per lo stesso scopo si ha la tendenza ad operare con soluzioni alla più alta concentrazione possibile di zinco.

L'impianto di Monteponi ha dimostrato e dimostra la importanza dei processi elettrolitici per il nostro Paese che non può sviluppare i processi termici. Per la Sardegna lo sviluppo dell'industria dello zinco trova solo una limitazione nelle disponibilità di energia a prezzo conveniente. Si confida nello sviluppo ulteriore delle industrie elettriche della regione.

Riassumendo: il trattamento elettrolitico per zinco ha trovato una razionale applicazione con minerali adatti; è l'unico metodo che per ora permetta lo sviluppo dell'industria dello zinco in Italia; in esso il consumo di energia (4 a 5 kWh per Kg. di metallo, escluse le operazioni sussidiarie all'elettrolisi) è più elevato rispetto ai processi idrometallurgici degli altri metalli e perciò ne implica la disponibilità a prezzi adeguati. Gli impianti di preparazione dei minerali, lisciviazione, depurazione delle soluzioni, hanno in questa industria una mole ed un'importanza maggiore rispetto alle altre consimili.

Piombo e stagno.

L'affinamento del piombo è rimasto limitato agli impianti americani che applicano il noto processo Betts; la capacità complessiva di questi impianti è di 250 tonn. giorno. Esso conserva la sua importanza per la depurazione dal bismuto che viene recuperato con notevole vantaggio e che non può essere separato col metodo Parkes.

Nell'impianto di Omaha della Am. Smelting & Ref. Co. si usa il processo Parkes per il piombo grezzo a debole tenore di bismuto; il processo elettrolitico per quello ad alto tenore di questo metallo che è prezioso.

Digitized by Google

Si stanno compiendo tuttora notevoli esperimenti per usare un elettrolito meno costoso, rispetto a quello ad acido idrofluosilicico, di Betts, tentandosi nuovamente l'uso di acidi solfonici organici meno costosi. L'impiego dell'ac. fluosilicico importa un notevole aggravio all'economia del processo per le perdite dell'elettrolito cui è vincolato e ostacola la diffusione del metodo, pur avendosi gli elevatissimi rendimenti rispetto all'energia (7,5 a 10 Kg. di raffinato per 1 kWh), dati dall'alto equiva-lente elettrochimico del metallo. La raffinazione elettrolitica è rimasta limitata a casi particolari, anche per il progredire dei metodi termici e chimici d'affinamento. Al processo Parkes si aggiunge ora quello Harries, della fusione con miscele saline ossidanti contenenti alcali.

L'estrazione del piombo per elettrolisi umida è stata già studiata ampiamente. L'impulso è venuto dai recenti prezzi elevati e dalla relativa scarsezza di produzione verificatasi negli ultimi anni. L'idrometallurgia dello zinco offre talvolta residui a basso tenore di piombo contenuto come solfato; a questi si è rivolta l'applicazione del processo umido per estrazione con soluzioni concentrate di cloruro sodico e susseguente elettrolisi. Il problema è attraente per le officine che già siano attrezzate con impianti elettrolitici ed abbiano energia a basso prezzo.

Il rendimento è buono, 5,5-6,4 kg. per 1 KWh. (altissimo se si confronta con i 250 gr. medi dello zinco); ma il piombo ottenuto è spugnoso e fonde con larga formazione d'ossido. Il processo non è poi così semplice come può apparire a prima vista.

Il problema è certamente molto interessante, anche in rapporto alla nostra industria dello zinco elettrolitico, ma per il momento non presenta un interesse economico decisivo.

Per lo stagno, oltre agli impianti per il suo recupero dai residui e dai ritagli di latta, che abbiamo anche in Italia, funziona dal 1916 una grande installazione di purificazione per via elettrolitica, a Perth Amboy N. J. negli S.U.A., della Am. Smelting e Ref. Co., con una produzione di circa 1500 tonn. mensili. L'impianto lavora con elettrolito costituito da ac. solforico e solfato di sodio, con aggiunta di colla e di cresolo per elevare la tensione superficiale della soluzione, che induce, come sempre, depositi metallici compatti. Per l'economia del processo è importante, anche in questo caso, il recupero dei preziosi, compreso il bismuto, contenuti nel metallo grezzo.

Ferro.

L'idrometallurgia del ferro, che è stata diretta ad ottenere ferro ad elevato grado di purezza, quale si ottiene dall'elettrolisi delle soluzioni di sali ferrosi, è stata molto discussa all'estero. Il suo campo d'azione appare limitato alla produzione di tubi ed oggetti consimili direttamente su catodo ruotante. Per ora non è dato prevederne lo sviluppo.

Oltre al processo di elettrolisi del tipo dell'affinamento, partendo da rottame di ferro e con elettrolito più generalmente costituito da cloruro ferroso, in miscela anche con altri cloruri, abbiamo tuttora in studio i processi di estrazione basati sull'azione di cloruro ferrico, generato all'anodo, sulla pirrotite ($2\,Fe\,Cl_3 + Fe\,S = 3\,FeCl_2 + S$). Questo metodo è stato proposto per solfuri contenenti rame che viene recuperato dalle soluzioni cloridriche mediante cementazione. La pirrotite potrebbe anche ottenersi dalla pirite per via termica.

In Francia lavora da tempo l'impianto della Soc. Le Fer a Grenoble per produrre tubi; con risultati analoghi, soddisfacenti, funziona in Italia l'impianto di Pont S. Martin.

Metalli vari.

Chiudendo questa rassegna dovremmo soffermarci sulle raffinazioni del nichel, dei metalli preziosi e sui processi di galvanostegia.

La raffinazione di nichel si applica a casi favorevoli. La International Nichel Co. a Port Colborne nel Canadà la applica a metallo impuro contenente platino e metalli preziosi del gruppo del platino.

In merito alla deposizione del nichel accenneremo all'interessante processo di C. P. Madsen (1916) con cui si ottiene metallo duttile per mezzo di periodiche immersioni ed estrazioni successive del catodo dal bagno elettrolitico.

Nei metalli preziosi noteremo l'estendersi del metodo elettrolitico per l'affinamento dell'oro dal cosidetto *doré*.

Più vasto cenno meriterebbero i moderni processi di galvanostegia che si sono molto avvantaggiati dalla pratica delle moderne grandi applicazioni dell'idrometallurgia. Fra i processi più recenti deve notarsi la cromatura, che va diffondendosi.

* * *

ALCALI CAUSTICI, CLORO, IDROGENO

Alcali caustici e cloro.

L'elettrolisi dei cloruri alcalini si applica ora principalmente alla produzione degli alcali caustici e del cloro dai cloruri di sodio e di potassio. Ha maggiore importanza, come massa di produzione, per la soda caustica; ma per l'idrato potassico costituisce l'unico metodo di preparazione oggi praticato nell'industria; anzi il carbonato potassico puro si prepara in notevoli quantità partendo dall'alcali elettrolitico.

L'industria degli alcali e del cloro si differenzia notevolmente da quelle metallurgiche cui abbiamo sopra accennato. In queste l'elettrolisi è una delle fasi di un ciclo di lavorazione, in cui gli altri trattamenti sono di frequente ragguardevoli per mole di impianti e per condizioni d'esercizio. Invece quella degli alcali è un'industria tipicamente chimica in cui l'operazione principale è l'elettrolisi che, con il proprio impianto di celle a struttura e funzionamento più delicato e complesso, occupa un posto di gran lunga più importante delle installazioni ed operazioni sussidiarie.

Digitized by Google

Inoltre, in molti casi, le industrie idrometallurgiche lavorano su minori differenze di prezzo fra materia prima greggia ed il metallo finiti, ed implicano perciò, per un funzionamento economico, mole talora vastissima, con forti disponibilità di energia ai prezzi più bassi. Per contro l'industria degli alcali elettrolitici può essere esercitata su scala molto minore e permettere l'impiego di energia a prezzi più elevati. Essa si è diffusa maggiormente nei paesi in cui più attive sono le industrie chimiche ed affini, e più elevato è il consumo di cloro.

L'industria in parola si è ormai fissata su alcuni tipi di celle che sono ben noti e descritti: lasciando da parte le cosidette celle a campana, ricorderò che i più diffusi sono gli elettrolizzatori a diaframma dei diversi tipi, e quelli a catodo di mercurio.

Le celle a mercurio hanno subito ben poche modifiche nell'ultimo quindicennio; più vivace è stato lo studio e molteplici le variazioni avutesi nei tipi a diaframma, che si aggirano ormai su alcuni modelli che l'esperienza ha fatto preferire. Si dipartisce dagli altri apparecchi a diaframma la cella Monthey cui accennerò in seguito. Nelle celle in parola è sempre delicato il funzionamento dei diaframmi che sono attivamente studiati: si è parlato l'anno scorso di un nuovo diaframma in vetro poroso che sarebbe allo studio in Germania.

In Italia abbiamo, nei principali impianti, i seguenti tipi: Società Pomilio, celle a diaframma a controcorrente, brevetto Giordani-Pomilio; celle Monthey, brevetto della Soc. C.I.B.A., a Bussi, caratterizzato dal *catodo propulsore* verticale in cui l'alcali, formatosi in un comparto a diaframma a sacco, viene di continuo sollevato dall'idrogeno emulsionato; infine gli impianti a mercurio col sistema Kellner-Solway dalla Soc. Caffaro a Brescia, della Società Bonelli a Cesano Maderno, degli Stabilimenti di Rumianca, della S.I.P.E. a Cenio.

In Germania si sono molto diffuse le celle Siemens-Billiter a diaframma filtrante orizzontale; negli S.U.A. le celle derivate dalla Hargreaved-Bird, quali la Townseud, Allen Moore, Nelson, Gibbs a diaframma filtrante verticale. Le celle Siemens-Biliter offrono notevole semplicità, robustezza di costruzione e scarsa manutenzione.

Come è noto il consumo d'energia è più elevato con il processo al mercurio: per 1 Kg. di Na OH negli apparecchi di questo tipo sale a 3,5-3,7 kWh, mentre con le celle a diaframma a 2,5-3.

La produzione mondiale degli alcali elettrolitici corrispondeva nel 1914 ad una potenza installata di circa 57 mila kW.: attualmente corrisponde in cifra tonda a 100 mila kW.

I diversi tipi di celle, stando ai dati di Billiter, sono così distribuiti:

Celle Siemens Billiter	32%
» Griesheim Electron	20%
» a mercurio	18%
» Hargreaves - Bird, Allen-Moore, Nelson	11%
» Townsend	11%
» a Campana	3%
» Badische	3%

La potenza complessiva delle nostre maggiori fabbriche è di circa 78.000 Kg. giorno di cloro e di 89.000 Kg. di soda (Na OH).

A tutti è nota l'importanza per l'economia nazionale, della produzione degli alcali caustici il cui sviluppo più recente è dovuto anche a nostre grandiose industrie, quale quella della seta artificiale col processo della « viscosa ». In questa industria, come nella mercerizzazione dei tessuti, e in molte altre industrie, può essere impiegata la soda a 36° Bè pura proveniente dalle celle a mercurio.

In Italia si sono maggiormente diffusi gli impianti a mercurio che forniscono direttamete la soda pura in soluzione concentrata, commerciabile come tale, e che semplificano gli impianti non essendo necessaria l'evaporazione delle liscive prodotte dalle celle a diaframma con il recupero del sale presente.

È stato già osservato: il processo a diaframma è preferito nei paesi aventi combustibili a basso prezzo ed energia costosa; il processo a mercurio si è diffuso da noi per l'energia a miglior prezzo e per il maggior costo dei combustibili.

Giova notare però che i nostri impianti a celle con diaframmi si sono notevolmente avvantaggiati con i procedimenti moderni di evaporazione a ricompressione del vapore (11 kg. circa di acqua vengono evaporati dal liscivio, con 1 Kg. di vapore e 1 kWh).

La soda al mercurio, ha assunto ormai in Italia un'importanza particolare per la fabbricazione dei prodotti intermedi per i coloranti sintetici. Il processo Poma permette di produrre con l'amalgama di sodio la benzidina, con rendimento che regge la concorrenza estera, con recupero della soda ottenuta nella decomposizione dell'amalgama stessa.

Per il nostro Paese ha notevole importanza l'idrogeno generato nella fabbricazione della soda, ed assistiamo ora all'estendersi dell'impiego di questo pregevole sottoprodotto per molteplici trattamenti chimici. È recente l'impianto di Brescia, presso la Società Caffaro, per produrre, con l'idrogenazione degli olii, grassi solidi. Si accenna di già a studi per la sintesi dell'alcool metilico e dell'aldeide formica dall'ossido di carbonio, già applicata all'estero. Altre utilizzazioni sono possibili.

L'impiego del cloro, a prezzi adeguati, rappresenta sempre il problema saliente dell'industria degli alcali caustici elettrolitici. Dobbiamo notare però che la nostra situazione è andata sensibilmente migliorando dall'ante guerra, pur essendo cresciuta notevolmente la produzione del reagente in parola. Non siamo più soltanto limitati o quasi alla produzione del cloruro di calce. Le applicazioni del cloro vanno sempre più diffondendosi nell'industria di chimica organica che si è affermata nel nostro Paese. Ricordiamo la sintesi di importanti prodotti intermedi per le materie coloranti, consumati su vasta scala, partendo dal monocloro e dal diclorobenzolo; la sintesi dell'acido mono e dicloroacetico e della serie dei cosidetti cloruri di acetilene; la preparazione di derivati clorurati della naftalina e infine del tetracloruro di carbonio, usato come solvente; del cloruro di solforile e del fosfogene impiegati come reagenti nell'industria stessa di chimica organica.

Digitized by Google

Non può concepirsi una fabbrica moderna di materie coloranti organiche senza una disponibilità adeguata di cloro.

Nel campo della grande industria dobbiamo annoverare inoltre i processi per l'ottenimento della cellulosa e di pasta semi-chimica, per la carta, dalla paglia e dallo sparto, con impiego del cloro, col processo Pomilio-Cataldi e con quello della Società Elettrochimica Italiana.

Nell'industria di chimica inorganica e degli anticrittogamici l'Italia già da tempo impiega largamente cloro, sia direttamente, che per via indiretta come acido cloridrico sintetico dal cloro, Ora potrà aggiungersi un notevole impiego di questo acido per il trattamento Blanc delle nostre leuciti.

Forse più lento, ma sicuro, sarà poi l'estendersi del consumo di cloro liquefatto, come disinfettante e sbiancante, in concorrenza al cloruro di calce ed agli ipocloriti. Basti a questo proposito ponderare le seguenti cifre: nel 1925 negli S. Uniti e Canadà si sono prodotte 185.000 tonn. di cloro, di cui circa 46.000 commerciate allo stato liquido; in Germania si produrrebbero circa 70.000 tonn. di cloro annue, di cui circa 24.000 verrebbero prodotte in forma di liquidi.

L'Italia può guardare con tranquillità all'avvenire delle sue industrie elettrochimiche per alcali e cloro. Senza dubbio in questo campo possediamo anche una lunga, preziosa esperienza e tecnici veramente egregi ed esperti. Tali industrie sono anche un potente mezzo per la difesa nazionale: la guerra chimica richiede ingenti masse di cloro non solo come tale, ma come reagente per il fosfogene, per la stessa *iprite*, per le cloroarsine. La guerra chimica si deve basare principalmente su pochi veleni, potenti si, ma producibili anche in grandi quantità: la produzione del cloro e dei suoi derivati, costituisce la base maggiore della difesa chimica del Paese.

Idrogeno.

L'Italia attualmente ha il primato nella produzione dell'idrogeno elettrolitico; produzione che si è sviluppata dal 1900 in poi per l'industria dell'ammoniaca sintetica. Oggi noi abbiamo installati od in via di installazione i seguenti impianti:

Società	Alto Adige Ammonia, Merano e Sinigo	kW	32.000
»	Sarda Amm. e Prod. Nitrici, Oschiri	»	6.000
»	Italiana Ammonia, Mas	»	2.200
»	Piemontese Ammonia, Novara	»	8.500
»	Italiana Ammoniaca Sintetica, Nera Montoro e Terni.....	»	6.400
»	Azogeno, Bussi	»	3.500

La potenza complessiva risulta di 70.000 kW.

Le celle usate sono fra le più moderne. Nel Gruppo delle Società Ammonia, facenti capo alla « Montecatini », si impiegano gli elettrolizzatori Fauser a diaframma d'amianto. A Bussi sono in azione le celle Knowles di tipo analogo. Negli impianti della Società Ammoniaca sintetica si hanno gli apparecchi Pechkranz della Società Hidroxygène di Ginevra che rappresentano una delle celle più moderne e perfette. Analogamente agli apparecchi Schmidt-Oerlikon, sono costituiti da una serie di piastre bipolari, ma i diversi comparti sono separati da un diaframma isolato, formato da una lamina di nichel, ottenuta per via elettrolitica, recante 1200 fori per cmq.. Questo apparecchio permette l'installazione di unità ad alta tensione, fino a 160 Volt, e di elevata poenza, fino a 360 kW.

Il consumo di energia con questi diversi elettrolizzatori è presssochè identico, a parità di densità di corrente: 4,25 a 6,5 kWh per mc. di idrogeno.

La produzione dell'idrogeno col metodo elettrolitico è in diretta concorrenza con i metodi di preparazione di questo gas (o della miscela idrogeno-azoto) per l'ammoniaca, dal coke: cioè con i noti processi della Badische per gassificazione del coke, e con quelli Claude per frazionamento del gas di cokeria.

Il confronto fra il metodo dell'elettrolisi e quello Badische non può certo compiersi sulla base dei 6 kWh medi, e del Kg. di coke occorrenti rispettivamente per 1 mc. di idrogeno, giacchè a vantaggio del processo elettrolitico sta la grande purezza del gas e quindi la semplicità degli impianti di preparazione della miscela reagente. Ma deve tenersi presente che l'elettrolisi non risolve in questo caso il problema di un trattamento speciale, in quanto essa sia l'unico mezzo od il mezzo più economico impiegabile. Al sorgere della nostra industria hanno concorso le disponibilità di energia idroelettrica, la necessità di rendere il nostro Paese indipendente dall'importazione di sostanze azotate.

Si tratta di un'industria « *chiave* », per la pace e per la guerra. La nuova industria è indipendente in modo assoluto dall'importazione di ogni materia prima.

Nello sviluppo della produzione nazionale dei concimi azotati l'ammoniaca sintetica è venuta a sostituirsi alla calciocianamide, che richiede un consumo pressochè pari di energia (circa 20 kWh per 1 Kg. di azoto fissato), e inoltre quello del carbone per l'ottenimento del carburo di calcio (3 Kg. circa per 1 Kg. di azoto).

Il gruppo Società Ammonia applica il processo Fauser, la Società Ammoniaca sintetica quello Casale. Entrambi questi tipi d'impianto per la sintesi sono analoghi a quelli della Badische. La Società Azogeno applica invece il metodo Claude ad alta pressione, col quale sta compiendosi anche l'impianto di Vado Ligure che funzionerà con l'idrogeno prodotto dal gas della vicina cokeria.

Gli impianti Fauser e Casale, oltrechè per la loro propria attrezzatura, si distinguono da quelli stranieri per la preparazione della miscela impiegando azoto ottenuto dall'aria per combustione dell'ossigeno con l'idrogeno stesso. Fauser impiega ora l'azoto residuo dalla combustione dell'ammoniaca per acido nitrico, avente circa il 3 % di ossigeno.

Non mi soffermerò a dimostrare l'importanza nazionale di questi impianti, sia per la produzione dei

Digitized by Google

concimi azotati, sia per l'industria dei prodotti organici e degli esplosivi.

L'aggruppamento degli impianti facenti capo alla Montecatini costituisce una delle imprese più vaste, complesse, ardite del mondo nel campo delle industrie chimiche. Il processo Casale è stato applicato in diversi impianti all'estero.

L'idrogeno è un reagente il cui impiego va sempre più accentuandosi nelle grandi industrie dei prodotti organici. Già accennai all'indurimento dei grassi e alla sintesi dell'alcool metilico. Ora si annuncia all'estero la sintesi, parallela a quella degli olii leggeri, di idrocarburi superiori quali le vaselline e le paraffine solide. È probabile che si affermino altre sintesi di prodotti organici ricchi alle quali potrà forse convergere una parte della futura produzione nazionale dell'idrogeno.

* * *

Il compito dell'elettrochimica italiana non è limitato ai soli problemi accennati nel riassunto che chiudo. Diverse applicazioni minori dell' elettrolisi meriterebbero attento esame : alcune di esse possono rappresentare industrie di mole modesta, ma economicamente importanti, per la ricchezza dei prodotti conseguibili e per il maggior premio che possono offrire all'energia impiegata. L'industria dell'acqua ossigenata dai persolfati, di cui abbiamo in Italia due piccoli impianti, costituisce un esempio del genere.

Molteplici problemi si presentano ancora agli elettrochimici italiani che, sebbene consci di tutte le difficoltà, guardano con sicura fede all'avvenire dell'elettrochimica cui è affidata larga parte della valorizzazione delle ricchezze nazionali.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. ING. ANGELO BARBAGELATA

R. SCUOLA D'INGEGNERIA DI MILANO

LA MISURA DELLE GRANDEZZE ELETTRICHE

Digitized by Google

Digitized by Google

1. - È stato detto che una delle ragioni del rapido progresso dell'elettrotecnica è da ricercarsi nella grande facilità con cui si possono misurare le diverse grandezze elettriche, cosicchè ogni tentativo, ogni nuovo apparecchio può essere immediatamente ed esattamente controllato nei suoi risultati. E se si pensa, per contrasto, alla difficoltà di molte delle corrispondenti misure nel campo della termica, dell'idraulica o anche della ordinaria meccanica, non si può negare un grande fondamento di verità ad una simile affermazione. D'altra parte, considerando anche il grandissimo aiuto che le misure elettriche hanno dato e sempre più danno alle ricerche tecniche in genere, si troverà logico, che, in una pubblicazione destinata a fissare la situazione dell'elettrologia e dell'elettrotecnica un secolo dopo la morte di Volta, un capitolo sia dedicato alle misure.

* * *

2. - L'invenzione della pila, come ha segnato il principio della conoscenza e delle applicazioni dell'energia elettrica, ha anche aperta la via alle misure relative. Prima della pila di Volta l'unico apparecchio elettrico di misura era l'elettroscopio a foglie d'oro, ed è noto con quale ammirevole sagacia i fisici del tempo ed il Volta in particolare abbiano saputo valersi delle sue modeste indicazioni qualitative. (Solo molto più tardi il suo stesso fondamento scientifico doveva condurre ad un apparecchio di misura quantitativa, veramente fondamentale, come l'elettrometro a quadranti).

Creata, con la pila, la possibilità di una corrente elettrica continua, non dovevano tardare a comparire i primi strumenti di misura, e già prima della morte di Volta, l'osservazione dell'azione delle correnti sull'ago magnetico da una parte e, dall'altra, il fenomeno dell'elettrolisi, avevano dato origine al *galvanometro* ed al *voltametro*: due apparecchi veramente fondamentali per la misura delle intensità di corrente e delle quantità di elettricità, che hanno meritatamente diffuso nel mondo il nome dei due grandi italiani; ma che dovrebbero ormai più razionalmente chiamarsi microamperometro e coulombometro.

Con questi due apparecchi si apriva veramente la via alle ricerche ed alle misure. Se infatti consideriamo oggi, *a posteriori*, al lume di quelle cognizioni che formano ormai il corredo di ogni modesto elettrotecnico, la successiva evoluzione delle misure elettriche, vediamo facilmente come partendo da quei due soli strumenti doveva essere possibile di dedurre e realizzare tutte le misure elettriche fondamentali. Bastava infatti stabilire, anche empiricamente, una unità di misura per *l'intensità di corrente* (ed il voltametro consentiva di basarsi perciò sulle azioni chimiche della corrente elettrica, come poi fu fatto) e scegliere un campione, pure empirico, ma facilmente riproducibile, di *resistenza*. Scaturiva così immediatamente l'unità per le differenze di potenziale e per le forze elettromotrici, che potevano alla lor volta misurarsi valendosi dello stesso galvanometro con grande resistenza in serie e tenendo naturalmente conto, colle leggi oggi perfettamente note, della piccola corrente da esso sottratta. Realizzati così sostanzialmente *voltmetro* ed *amperometro* tutte le misure assolute e relative di resistenza e di potenza diventano facilmente eseguibili. Un siffatto procedimento sperimentale deduttivo, a chi volesse prendersi oggi il capriccio di riprodurlo, richiederebbe ovviamente una notevolissima somma di lavoro e grande acume, e grandi cautele per evitare le molteplici e note cause di errore che insidiano i successivi trapassi.

Non può quindi far meraviglia che il suo sviluppo abbia richiesto una sessantina d'anni, quando si pensi che le leggi che a noi oggi servirebbero di facile e sicura guida nell'impresa, erano tutte ancora da scoprire e da formulare e che, particolarmente, il concetto per noi fondamentale di resistenza ohmica e di resistività doveva tanto tardare a delinearsi. La considerazione a posteriori delle difficoltà da superare e superate fa anzi ingigantire la nostra ammirazione per quel manipolo di Grandi i cui nomi ricorreranno senza dubbio con grande frequenza in questa pubblicazione, che nei tre quarti di secolo susseguiti all'invenzione della pila, prepararono il terreno al meraviglioso successivo sviluppo dell'elettrotecnica. Perchè non va dimenticato che tutte le basi dell'elettrotecnica furono gettate dai fisici e dagli studiosi nei laboratori scientifici, senza quegli stimoli derivanti dalle necessità o dagli interessi materiali che così potentemente hanno influito sullo sviluppo di altri rami della tecnica. Solo nell'ultima parte del periodo considerato i bisogni dell'industria

Digitized by Google

dei telegrafi — la prima grande applicazione dell'elettricità, in ordine di tempo — e particolarmente le prime pose di cavi sottomarini poterono influire sull'andamento delle ricerche scientifiche e ad essi si deve particolarmente lo sviluppo dei metodi di misura delle induttanze e delle capacità e delle grandi resistenze di isolamento.

Comunque, prescindendo da un assoluto rigore cronologico, è lecito dire che il nucleo più importante di quelle che noi oggi chiamiamo misure elettriche di laboratorio, abbia preceduto le grandi applicazioni industriali dell'energia elettrica, che dovevano poi trovare in esse uno strumento formidabile di progresso. Si trattava infatti di un complesso di metodi di indagine e di misura già meraviglioso. Con mezzi relativamente modesti, galvanometri, pile, cassette di resistenza e chiavi, si era infatti giunti a misurare le varie grandezze elettriche con una precisione ignota alla maggior parte delle applicazioni tecniche. Dai primi metodi che usavano il galvanometro come strumento indicatore diretto, sfruttando la proporzionalità delle sue deviazioni (quanta ingegnosità in taluni degli antichi metodi per *campionare* un galvanometro !), passando attraverso ai metodi di uguale deviazione ed ai galvanometri differenziali, si era giunti ai metodi di riduzione a zero nei quali al galvanometro è riservata la semplice funzione di svelare il passaggio di una corrente, e che nelle due disposizioni tipiche di ponte di Wheatstone e di metodo di opposizione (Poggendorf) sono ancora il fondamento dei più moderni laboratori.

L'unificazione internazionale delle unità di misura seguita a Chicago, quando ancora la grande industria elettrica moveva i primi passi, e frutto anch'essa di un lungo lavoro scientifico preparatorio, dava agli elettrotecnici un altra formidabile arma di progresso, riducendo per così dire allo stesso denominatore gli studi e le ricerche eseguite in ogni parte del mondo ed offrendo agli studiosi di ogni paese la maggior facilità di intendersi.

* * *

3. - Questo a cui abbiamo finora accennato, potrebbe considerarsi come il periodo classico nella storia delle misure elettriche. Sempre prescindendo da ogni rigore cronologico i successivi periodi potrebbero chiamarsi, seguendo lo sviluppo delle grandi applicazioni elettrotecniche, il *periodo della corrente continua*, il *periodo delle correnti alternate* ed il *periodo delle alte frequenze*.

Quantunque per qualche sporadica applicazione industriale la corrente alternata abbia preceduto la corrente continua, l'industria fondamentale della distribuzione elettrica dell'energia è sorta quando il Gramme, riprendendo con criterio più industriale l'opera del nostro Pacinotti, creava la macchina indispensabile alla trasformazione dell'energia meccanica in energia elettrica. Gli strumenti di misura necessari al controllo della nuova industria esistevano già embrionalmente nei laboratori, cosicchè fu facile giungere alla realizzazione dei primi Amperometri e voltmetri industriali, sia modificando alquanto i più recenti tipi di galvanometri, (come il D'Arsonval) sia utilizzando le azioni attrattive dei rocchetti su àncore di ferro, già studiate nei laboratori, sia ancora sfruttando le piccole dilatazioni dei conduttori riscaldati per l'effetto Joule. Nè occorreva di più; potendosi immediatamente ricavare, dalla misura delle tensioni V e delle intensità I, i valori delle potenze P e delle resistenze R: le sole grandezze che interessano nell'esercizio di un impianto a corrente continua.

Ben presto a dir vero, doveva sentirsi il bisogno di un nuovo tipo di istrumento di misura. Le considerazioni energetiche — da cui noi oggi non sappiamo assolutamente mai prescindere e che costituiscono una guida tanto preziosa per lo studio dei più complessi fenomeni — sono necessariamente comparse molto tardi nei laboratori dei fisici e vi furono per molto tempo considerate di secondaria importanza. Ma non appena si potè constatare come l'energia elettrica distribuita fosse un *bene* reale, convertibile in danaro, sorse la necessità di un apparecchio per misurarla. Da prima, come è noto, colla convenzione di supporre costante uno dei due fattori della potenza ($P = VI$), e generalmente la tensione, si potè ricondurre la misura dell'energia $W = \Sigma\, VI.dt$ a quella di una quantità di elettricità $Q = \Sigma I.dt$, e si potè ricorrere all'antico voltametro, che sotto forme diverse, diede origine ai primi contatori industriali, e conta ancora oggi numerose applicazioni in alcune reti di distribuzione inglesi. Più tardi, volendo prescindere da una ipotesi che non sempre poteva trovare sufficiente riscontro nella pratica, si dovette affrontare il problema del contatore elettromeccanico. Ancora il laboratorio scientifico, dove, con lo studio delle azioni elettrodinamiche, era nato l'elettrodinamometro, additò la via per la misura diretta del fattore *potenza*. La misura del fattore *tempo* potè essere ottenuta per due vie diverse: sia ricorrendo all'artificio del disco rotante fra le espansioni polari di un magnete permanente, che deve vincere una coppia praticamente proporzionale ad una velocità angolare, ossia inversamente proporzionale ad un tempo ($\omega = 2\,\pi\, n = \frac{2\,\pi}{T}$); sia, come nei contatori Aron, ricorrendo ancora una volta all'organo fondamentale per la misura del tempo, al pendolo.

L'armamentario per l'esercizio di una distribuzione di energia a corrente continua era così completo e non si trattò in seguito che di perfezionare i vari apparecchi, secondo le esigenze della tecnica, derivandone anche i corrispondenti tipi registratori.

* * *

4. - Con l'avvento della trasmissione e distribuzione di energia a correnti alternate, legate anch'esse al nome di un grande italiano, un nuovo elemento fondamentale veniva a complicare le misure indispensabili al controllo industriale dell'esercizio di un im-

Digitized by Google

pianto. Con le correnti continue infatti, le grandezze fondamentali da controllare sono quattro (V, I, P, R) ma di esse solamente due sono indipendenti, cosicchè come si è visto due soli strumenti di misura possono a rigore bastare (Non si considera qui l'energia perchè, dal punto di vista puramente elettrico, essa si riconduce ancora ad una misura di potenza, l'altro fattore di essa essendo il tempo).

Con le correnti alternate alle quattro grandezze fondamentali ricordate si aggiunge lo spostamento di fase o il *fattore di potenza* che lega le V, I e P, cosicchè le grandezze indispensabili diventano tre. Anche alla resistenza R si deve sostituire, con le correnti alternate, l'impedenza Z e diventa quindi necessario considerare anche la reattanza X; ma comunque è ben noto come delle sette grandezze V, I, P, cos φ, Z, R, X, solo tre siano da considerare indipendenti. Così per esempio dalla misura di V, I, P si possono immediatamente e facilmente derivare le altre quattro grandezze.

Sono storia di ieri le confusioni e gli errori dovuti allo spostamento di fase nei primi esercizi a correnti alternate ed a Galileo Ferraris spetta in gran parte il merito di aver messe in chiaro le cose. Nel campo poi degli utenti profani, che, con le correnti continue si erano avvezzati, con fondamento di verità, ad assumere l'intensità di corrente come espressione della potenza, il fattore di potenza fu per molto tempo considerato con diffidenza come un trucco del venditore d'energia destinato ad imbrogliare l'aquirente! Comunque la tecnica potè ancora basarsi sull'esperienza dei laboratori per risolvere il problema, derivando facilmente, come si è detto, il wattmetro, il terzo strumento di misura resosi indispensabile, dall'elettrodinamometro a sospensione. Certamente le difficoltà non furono nè poche nè lievi perchè con le correnti alternate i fenomeni di induzione davano origine ad inaspettate cause di errore; ma esse poterono essere abbastanza rapidamente superate perchè le esigenze della tecnica fecero questa volta convergere gli sforzi degli studiosi, nei laboratori e nelle fabbriche, sui problemi via via più assillanti.

Così anche il problema del misuratore di energia dovette essere ripreso perchè il contatore elettrodinamico, creato come si è detto per le correnti continue, presentava errori di fase e di attrito intollerabili per le sempre maggiori esigenze degli esercizi; mentre il contatore a pendoli rimaneva, come rimane tutt'ora, l'apparecchio d'eccezione per la delicatezza intrinseca della sua costruzione e per il conseguente costo elevato. E nacque, questa volta nelle fabbriche, il moderno contatore ad induzione che rappresenta forse l'esempio più tipico di quello che possa ottenersi collo studio tenace e colla paziente ricerca di perfezionamento, in quanto di uno strumento che racchiude intrinsecamente in sè stesso innumerevoli e gravi cause di errore, si è giunti a fare un apparecchio di esattezza più che soddisfacente per i bisogni correnti della pratica.

Anche la rapida diffusione dei sistemi polifasi, e particolarmente del sistema trifase, impose dei nuovi problemi di misura, di cui i laboratori scientifici non avevano evidentemente avuto motivo di occuparsi. E si formò tutta la nuova tecnica delle misure sui sistemi trifasi, che va dai metodi di controllo destinati a determinare tutte le grandezze caratteristiche di un sistema comunque asimmetrico e squilibrato, agli apparecchi speciali (wattmetri, fasometri, indicatori e registratori, contatori ecc.) destinati al rapido e sicuro controllo dell'esercizio.

* * *

Due altri punti sembrano degni di menzione in questa rapida rassegna: l'introduzione del *relais* e *del servomotore* nel campo delle misure e l'uso degli apparecchi *comparatori*. La risoluzione di molti problemi di misure industriali urtava contro le difficoltà, derivanti dalle limitatissime coppie motrici di taluni tipi di strumenti di misura. Senza parlare degli strumenti elettrostatici, che vantano un non invidiabile primato per quanto riguarda la debolezza della coppia, o di quegli speciali apparecchi che non ammettono molle antagoniste non potendo avere una posizione di riposo (come taluni tipi di strumenti, di fasometri e di frequenzimetri) anche gli ordinari wattmetri elettrodinamici non potevano raggiungere, se non superando i limiti ragionevoli di consumo, coppie sufficientemente energiche per azionare per esempio un sistema registratore. L'applicazione del noto artificio del relais e del servomotore, dovuta anch'essa ad un italiano — l'Ing. Arcioni — ha girato brillantemente la difficoltà risolvendo questo e molti altri problemi analoghi e consentendo, in generale, di trasportare nel campo industriale molti delicati strumenti di laboratorio, sempre che, bene inteso, non si tratti di misure di grandezze troppo rapidamente variabili.

I comparatori, come è noto, consentono invece di misurare una grandezza elettrica per confronto con un'altra ausiliaria facilmente regolabile e misurabile. Possono risultare dall'accoppiamento meccanico di due sistemi di misura su cui agiscono rispettivamente la grandezza ignota e la grandezza ausiliaria, oppure da un accoppiamento elettrico. In ogni caso il sistema è ricondotto alla sua posizione di equilibrio regolando la grandezza ausiliaria. La regolazione può essere fatta a mano nelle misure di laboratorio o a mezzo di relais e servomotore negli strumenti industriali. Numerose sono le applicazioni del procedimento per ricondurre per esempio la misura di una grandezza meccanica a quella di una grandezza elettrica; nel campo puramente elettrico il procedimento è stato applicato a misure di tensioni alternate elevatissime o alla misura di precisione di correnti alternate, ottenuta appunto regolando e misurando una corrente continua ausiliaria.

* * *

Come si è visto, dopo l'avvento delle correnti alternate la tecnica solo in parte potè giovarsi delle precedenti ricerche di laboratorio ma dovette ben presto additare essa i nuovi problemi ed imporre

Digitized by Google

le direttive per il loro studio. L'esempio più tipico del continuo reciproco aiuto fra tecnica e scienza ci è però mostrato da quanto avvenne per lo studio dei trasformatori di misura.

Non appena la tensione delle linee e delle reti cominciò ad elevarsi sopra qualche migliaio di volt, apparve intollerabile di continuare col sistema adottato nei primi impianti a tensione pericolosa, di usare cioè gli ordinari strumenti di misura ad inserzione diretta, rinchiusi in custodie di vetro o comunque sottratti, più o meno bene, all'eventuale contatto del personale. E poichè il problema era maturo, apparvero ben presto i primi riduttori di tensione e di corrente, che, sorti per una questione di sicurezza, si diffusero rapidamente in tutti gli impianti a corrente alternata per i loro grandi pregi di comodità e di economia. Ma pure presto si poterono constatare i sensibili errori che i riduttori introducevano nelle misure, sopratutto di potenza, per la variabilità del loro rapporto e del loro angolo di fase. La teoria dei trasformatori e quindi la causa prima di tali errori erano perfettamenti noti; ma bisognava trovare il modo di determinarne sperimentalmente entità e variazioni. Gli ordinari strumenti e procedimenti di misura applicabili ai trasformatori di potenza non erano più sufficienti e si dovette cercare qualche cosa di nuovo. Sorsero così nelle fabbriche i primi metodi di opposizione con correnti alternate, che in breve, perfezionati e sviluppati, passarono ai laboratori scientifici dove ormai contano fra i più preziosi mezzi di indagine nel campo delle correnti alternate. In una rapida sintesi come questa, non è consentito di entrare in particolari: basterà qui ricordare che per tali metodi si sono dovuti escogitare nuovi mezzi per ottenere una tensione, od una corrente, di fase regolabile ed esattamente determinabile (variatori di fase, induttanze, capacità shuntate, ecc.), e nuovi strumenti indicatori di zero, quali i *galvanometri a vibrazione*, i galvanometri ordinari accoppiati a *raddrizzatori sincroni od asincroni*, o, infine, gli *elettrodinamometri* a sospensione e ad eccitazione separata riportati dopo un lungo periodo di abbandono al posto d'onore nei laboratori. Vedremo più avanti quali difficoltà incontrino ancora questi più moderni metodi di ricerca e quali problemi debbano a loro riguardo essere ancora risolti.

* * *

Anche per quanto concerne gli *oscillografi* i rapporti fra i laboratori scientifici e l'industria furono assai stretti. Fin dai primi studi sulle correnti alternate si era sentita la necessità di poter rilevare la reale legge di variazione di fenomeni ciclici così rapidi ed il *disco di Joubert* può ascriversi ancora al periodo classico delle misure elettriche. Da esso discesero direttamente gli ondografi i quali non fanno altro che rendere continue ed automatiche le operazioni che col disco di Joubert devono essere fatte a mano. Ma di fronte alla necessità di studiare anche i fenomeni più rapidi e sopratutto quelli che non si ripetono ciclicamente nel tempo, gli ondografi risultarono ben presto insufficienti e si dovettero escogitare gli oscillografi per il cui organo fondamentale non si trattò in sostanza che di alterare le proporzioni di un galvanometro d'Arsonval, riducendone al minimo l'inerzia dell'equipaggio mobile e mantenendone lo smorzamento al valore critico.

Più tardi anche i più perfetti oscillografi elettromagnetici si dimostrarono in taluni casi insufficienti e si dovette cercare un sistema avente un'inerzia ancora più trascurabile; ed i tecnici poterono ancora trovare il fatto loro nei laboratori di fisica. Il tubo di Braun a raggi catodici potè facilmente trasformarsi in un oscillografo veramente ideale, sotto il punto di vista dell'inerzia. Il fatto ch'esso ci rappresenta i fenomeni in coordinate polari anzichè in coordinate cartesiane, costituisce un inconveniente facilmente superabile con un po' di abitudine; più grave la sua estrema sensibilità ai campi elettrici e magnetici esterni, che obbliga a grandi cautele nel suo impiego. Comunque la tecnica trova e troverà sempre più in esso un potente fattore di indagine.

* * *

5. - Con la comparsa, nella tecnica, delle *alte frequenze*, si inizia l'ultimo periodo della storia delle misure elettriche. Esso non è certo paragonabile con quelli ora considerati, e la divisione stabilita potrà anche apparire arbitraria perchè le alte frequenze regnano per ora sovrane solo nel campo della trasmissione del pensiero ed a parere di molti, le radio-trasmissioni escono dai campi dell'ordinaria elettrotecnica. Si può tuttavia osservare che se la telegrafia e la telefonia ordinarie possono veramente costituire un campo a sè per la piccolezza delle potenze e delle energie che esse richiedono, con le radiotrasmissioni le potenze in giuoco hanno assunto valori rilevanti (anche se oggi con il prevalere delle onde corte le potenze delle stazioni r. t. tornino a diminuire) e si sono rese necessarie misure di intensità di corrente e di potenze di carattere veramente industriale.

Ad ogni modo, volendo considerare questo nuovo periodo nella storia delle misure elettriche dallo stesso punto di vista da cui abbiamo considerato i precedenti, si può dire che esso è caratterizzato sopratutto da una nuova grandezza fondamentale che viene ad aggiungersi a quelle finora considerate come oggetto di misura: *la frequenza*.

Negli impianti industriali di distribuzione dell'energia, la frequenza rimanendo (o dovendo rimanere) costante poteva e può essere oggetto di controllo ma non di misura. Tanto è vero che per molti anni gli impianti stessi poterono funzionare senza bisogno di frequenziometri — bastando controllare la velocità angolare dei generatori. I frequenziometri, a risonanza o elettrodinamici o ad induzione, indicatori o registratori, sono venuti più tardi, col solo scopo — come si è detto — di controllare la regolarità dell'esercizio. Ma nella radiotecnica la misura della frequenza in giuoco o, se si vuole, della grandezza reciproca, *la lunghezza d'onda*, è diventata fondamentale; e poichè

Digitized by Google

i frequenziometri usati per le frequenze industriali per quanto ingegnosi non potevano servire per frequenze migliaia e diecine di migliaia di volte più grandi, si dovettero realizzare nuovi strumenti di misura: *ondametri* e *cimometri* divenuti veri « ferri del mestiere » per i tecnici delle radiotrasmissioni. Sono, com'è noto, apparecchi basati generalmente su quei fenomeni di risonanza elettrica, che, praticamente ignorati negli antichi laboratori attrezzati per le correnti continue, considerati come casi del tutto singolari nei laboratori e negli impianti a frequenza industriale, si sono portati al primo piano nei laboratori r. t. Ugual sorte hanno avuto conseguentemente le capacità d'ogni tipo e d'ogni genere che da una modesta funzione di « comprimarii » quale avevano negli antichi laboratori, sono diventate dei veri « protagonisti » nel campo delle alte frequenze.

La rapida e crescente diffusione delle stazioni r. t. e la conseguente necessità di usare lunghezze d'onda l'una dall'altra pochissimo differenti, ha fatto poi continuamente aumentare l' importanza e la ricerca dei metodi di grande precisione per la misura delle frequenze ; tanto che è oggi internazionalmente allo studio la realizzazione di un *campione internazionale di frequenza*, sfruttando la proprietà di alcuni cristalli, opportunamente eccitati da un campo elettromagnetico, di vibrare con una frequenza propria, costante, funzione della loro natura chimica e delle loro dimensioni ; allo stesso modo di un pendolo che riceva di tanto in tanto un impulso destinato a rifornirlo dell'energia dissipata dalle resistenze passive. Altri dirà probabilmente in questa pubblicazione, con maggior competenza, dell' importante problema.

* * *

L'altra caratteristica saliente delle misure elettriche con le alte frequenze è relativa ai fenomeni di auto e mutua induzione e derivati (correnti parassite, skin effect, etc.) che, come già avevano creato delle serie difficoltà passando dagli strumenti per correnti continue a quelli per correnti alternate, potevano apparire ostacoli quasi insormontabili, con frequenze così enormemente maggiori. E le ordinarie misure elettriche, trasportate nel campo delle alte frequenze, dovettero di fatto rinunciare alla maggior parte degli strumenti e dei procedimenti industriali, per valersi solo di quelli realizzabili con circuiti a bassissima costante di tempo, e indipendenti, nel loro funzionamento, dalla frequenza. Furono così rimessi in onore quegli strumenti termici che per i loro inconvenienti (primi fra tutti la delicatezza e l' incostanza) avevano già fatto il loro tempo nel campo industriale. Ma sopratutto si dovette estendere l'uso di quegli strumenti che utilizzano indirettamente l'effetto Joule : pile termoelettriche, galvanometri tipo Duddel, bolometri etc... Con tutto ciò le cause di errori derivanti dall'altissima frequenza permanevano sensibili, se pure in molti casi della pratica tollerabili. Ed a rendersene conto basta pensare che alle elevate frequenze r. t. non solo i valori delle resistenze e delle reattanze, ma quasi il loro stesso significato diventa malsicuro. Tanto che la costruzione ed il controllo di *resistenze*, grandi e piccole, *puramente ohmiche* costituisce un serio problema che, si può dire, attende ancora oggi una adeguata soluzione. Come lo attende il problema in un certo senso correlativo, di un campione di induttanza, praticamente indipendente dalla frequenza.

Ma la radiotecnica tutta e quindi le misure relative, dovevano compiere un gran passo coll' invenzione delle valvole termojoniche. Sarebbe anzi più esatto dire che tale invenzione ha segnato una vera data per tutti i rami dell'elettrotecnica che hanno ben presto cominciato a valersi e più si varranno in avvenire, del nuovo trovato. L'attitudine della valvola a tre elettrodi a rivelare e ad amplificare correnti debolissime di qualsiasi forma e frequenza e, d'altro canto, la sua possibilità di funzionare come generatore di correnti alternate di qualunque frequenza, ha aperto alle misure elettriche nuovi orizzonti. Ed i metodi di misura basati sulle valvole si sono rapidamente moltiplicati nei laboratori r. t., entrando poi anche in quelli di elettrotecnica generale, dove solo il naturale misoneismo degli uomini, o, ciò che fa lo stesso, la difficoltà di modificare rapidamente orientamento ed abitudini mentali, hanno finora ostacolato la loro più rapida diffusione.

* * *

6. - Visto così, nelle sue grandi linee, lo sviluppo delle misure elettriche, ci si può chiedere qual'è la situazione odierna, quali i problemi più importanti, quali i possibili progressi. Lasciando ad altri, più competenti, quanto particolarmente riguarda la radiotecnica e, in generale, le comunicazioni con e senza fili, considereremo separatamente le misure di laboratorio e le misure industriali, pur non potendosi dire a priori se le attese soluzioni verranno dalla tecnica piuttosto che dal laboratorio scientifico.

Nei laboratori le misure con le correnti continue sono oggi sostanzialmente quelle che erano alla fine del periodo che abbiamo chiamato classico. Solo la generale adozione dei metodi di riduzione a zero (che si riassumono nel ponte, nel doppio ponte e nel potenziometro) ed il perfezionamento costruttivo di molti apparecchi hanno reso tutte le misure ordinarie assai più facili e sicure. Sensibilità dell'ordine del decimillesimo e, quando occorra, del centomillesimo si possono agevolmente realizzare, senza ricorrere a certi veri *tour de force* di un tempo. Così certi sensibilissimi galvanometri con costanti di 10–15 mila divisioni per microampere — abbastanza facili da realizzare, ma praticamente impossibili da adoperare — hanno fatto il lor tempo salvo specialissimi casi. Anche nella valutazione della sensibilità di un galvanometro si è sempre più andati sostituendo la considerazione della sensibilità, e quindi della costante *voltmetrica* a quella della costante *ampermetrica* perchè di fatto, coi metodi di zero, i galvanometri devono di solito svelare l'esistenza o l'annullamento di piccolissime differenze di potenziale. Più logicamente ancora, sulla base di quei concetti energetici

Digitized by Google

di cui abbiamo fatto cenno, si dovrebbe riferirsi alla potenza richiesta dal galvanometro per dare la deviazione unitaria, potenza che, prescindendo dallo spessore dell' isolante, è indipendente dal modo come viene utilizzato il volume di rame dell'apparecchio (1). Galvanometri del tipo d'Arsonval a riflessione, che danno la deviazione unitaria con potenze dell'ordine di 6×10^{-15} watt, sono oggi comuni ed offrono sensibilità generalmente esuberanti. Solo per misure di enormi resistenze di isolamento possono talora occorrere sensibilità più spinte, per quanto la odierna maggiore facilità di valersi di tensioni elevate abbia ridotto notevolmente le difficoltà di un tempo. In proposito, vale la pena di ricordare che la generalizzazione degli anelli, schermi e circuiti di guardia costituenti veri sistemi di drenaggio delle correnti disperse, permette di superare agevolmente le difficoltà dei fantastici isolamenti una volta richiesti per simile genere di misure.

* * *

7. - Meno brillante è naturalmente l'odierna situazione dei laboratori per le misure a correnti alternate. Un'osservazione di carattere assolutamente generale, che può essere estesa a tutti i campi della tecnica, ci insegna che, quando, per un dato problema, si contendono il campo parecchie soluzioni che paiono egualmente buone, si può affermare che la *vera* soluzione non è ancora stata trovata. Quando lo sia, essa non tarda infatti ad imporsi ed a generalizzarsi.

L'osservazione può applicarsi ai moderni metodi di riduzione a zero (per opposizione o per proiezione) usati sempre più largamente con le correnti alternate. Si annoverano infatti cinque o sei modi diversi di variare e controllare la fase della tensione ausiliaria, ed altrettanti apparecchi o sistemi indicatori di zero. Non v'è dubbio che tali diversi sistemi possano tutti dare, e diano, realmente, buoni risultati quando siano bene adoperati ; ma troppa parte del successo è ancora lasciata al criterio ed all'abilità personale dell'esperimentatore ; mentre ovviamente un procedimento di misura è tanto migliore quanto minore è l'abilità richiesta a chi deve applicarlo. Le ragioni di questa relativa inferiorità dei metodi di precisione con correnti alternate, in confronto coi metodi corrispondenti a corrente continua, sono ovvie. In primo luogo si hanno qui due variabili indipendenti in luogo di una ; poi, per necessità di cose e per compensare la intrinseca minore sensibilità degli indicatori di zero, si deve lavorare di solito con tensioni notevolmente maggiori che aumentano corrispondentemente le intensità e gli inconvenienti delle correnti disperse. Di più la mutua induzione e le capacità concentrate o distribuite nei vari circuiti, danno origine ad altre correnti perturbatrici, del tutto ignote con le correnti continue e che diventano facilmente proibitive coll'aumentare della frequenza. La complessità dei circuiti rende spesso impossibile l'adozione dei circuiti di drenaggio, anelli di guardia e simili. Non si deve poi dimenticare che tutti questi metodi presuppongono grandezze perfettamente sinusoidali ed una frequenza assolutamente costante : condizioni in pratica spesso raggiungibili solo per approssimazione. Infine, nei riguardi dell'esattezza conseguibile, anche quando apparentemente i metodi non danno difficoltà, va tenuto presente che tutti i dispositivi adoperati presuppongono un certo numero di resistenze puramente ohmiche (con costante di tempo nulla) la cui costruzione è, come dicemmo, assai difficile e la cui esatta verifica è oggi molte volte impossibile. Su tutti i risultati ottenuti grava quindi l'ombra di questa incognita che alle frequenze ordinarie non può celare errori gravi, ma che comunque toglie ai metodi per correnti alternate la incomparabile precisione dei loro congeneri per correnti continue. Cosicchè, concludendo, v'è in argomento abbondante materia per importanti lavori di perfezionamento.

* * *

8. - Passando alle misure ed agli strumenti industriali si potrebbe ripetere l'antico detto che, almeno qualitativamente, « tutto va pel meglio nel migliore dei modi ». Si costruiscono oggi correntemente e si vendono a prezzi veramente modesti ogni sorta di apparecchi per qualsiasi genere di misura. Per qualunque grandezza elettrica che interessasse di misurare si fanno o si possono fare strumenti indicatori, registratori, indicatori di massimo ed integratori. Così anche le grandezze la cui misura fu per tanto tempo affidata alla cura del personale, che doveva sia pur semplicemente dedurla dalle indicazioni di due o più strumenti diversi (come la resistenza o impedenza, gli spostamenti di fase, variazioni di temperatura, etc.) possono oggi essere ottenute per lettura diretta, registrate etc. L'uso dei sistemi a relais ed a servomotore ha consentito infatti di registrare le indicazioni anche degli strumenti a coppia più debole : come taluni tipi di fasometri, di frequenziometri etc. Infine con la combinazione di svariati artifici come relais, comparatori, etc. è possibile oggi risolvere qualsiasi più complesso problema di misura industriale come quelli derivanti per esempio da complicati contratti di fornitura a tariffe variabili, e come per esempio quello di concentrare e totalizzare in un unico punto le misure di forniture di energia effettuate in località anche molto lontane, con diversissime condizioni di tensione, frequenza ecc. Siffatti dispositivi di cui si hanno già cospicui esempi in America, potranno talvolta riuscire notevolmente costosi, ma in linea tecnica il problema non presenta più alcuna seria difficoltà.

(1) Questa definizione della sensibilità di un galvanometro equivale a considerare come sua costante C (o cifra di merito) la media geometrica delle sue costanti voltmetrica K_v ed amperometrica K_a.

Risulta infatti :

$$C = \sqrt{K_a K_v} = \frac{\delta}{\sqrt{P}}$$

essendo P la potenza dissipata nel circuito dell'apparecchio per una data deviazione δ.

Digitized by Google

* * *

9. - Quali fra questi problemi di misura, potenzialmente già risolti, si imporranno in un prossimo avvenire allo studio ed all'opera di perfezionamento dei competenti? Noi riteniamo saranno verosimilmente quelli inerenti all'evoluzione delle tariffe di vendita dell'energia elettrica.

Vi fu un periodo in cui si credette che col rapido sviluppo degli impianti elettrici si sarebbe potuto giungere alla vendita generale a contatore a prezzo unico. Si è visto invece che le tariffe ed i contratti di vendita andarono sempre più complicandosi. Nè avrebbe potuto essere altrimenti, perchè la necessità di rendere sempre più economica per tutti l'energia elettrica, costringe ad adeguare i prezzi dei singoli utenti all'onere che ciascuno d'essi impone all'esercente. Il prezzo unico, a kilovattora, dovrebbe essere largamente comprensivo di tutti gli oneri e finirebbe col risultare eccessivo per la grande massa dei piccoli utenti.

Così è che le tariffe le quali tengono conto del fattore di potenza, un tempo giudicate di eccessiva complicazione, si vanno generalizzando in tutti i paesi, anche là dove non sono imposte per legge. Per quanto una grande opera di perequazione e di unificazione sia ancora da compiere a questo riguardo nelle varie tariffe, si può affermare che dal punto di vista della misura il problema sia già risolto con l'introduzione dei wattmetri integratori della potenza reattiva. A questi apparecchi è senza dubbio riservata una grande diffusione, tanto nella forma di indicatori che di registratori e di integratori. Il concetto di potenza reattiva, che riesce così ostico a molti per la contraddizione di termini insita nel nome stesso, (il quale del resto potrebbe anche essere modificato) è così utile e porta con sè tanti vantaggi di chiarezza e di semplicità nei problemi della pratica, che non ci stupiremmo se fra pochi anni gli apparecchi misuratori della potenza reattiva sostituissero sui quadri degli impianti gli attuali fasometri. È certo infatti che con la misura dei volt, degli ampere, della potenza reale e della potenza reattiva, le condizioni d'esercizio rimangono perfettamente definite, e tutti i ragionamenti e computi relativi, grandemente semplificati.

Ma un altro problema si delinea cogli odierni sistemi trifasi: quello dello squilibrio. Uno squilibrio fra le tre correnti del sistema importa, per l'esercizio, oneri che non sono economicamente da meno di quelli derivanti da un basso fattore di potenza (o, come si dovrebbe dire, da una eccessiva richiesta di potenza reattiva). Non è quindi improbabile che, fra qualche anno, anche di tale elemento si debba tenere conto nelle tariffe.

La questione è ormai completamente studiata in linea teorica, ed anche è risolto in linea generale il problema di misurare le intensità dei tre sistemi (diretto, inverso e monofase) nei quali si può sempre immaginare scomposto un qualunque sistema squilibrato. Si tratterà dunque solo di dare forma pratica ai corrispondenti dispositivi di misura. È bene accennare, a questo proposito, che tali nuovi sistemi di misura sono solo apparentemente più complicati degli attuali, perchè già oggi, per definire completamente un sistema trifase a quattro fili, asimmetrico e squilibrato, occorrono 3 voltmetri, 3 amperometri e 3 wattmetri monofasi. Gli stessi nove apparecchi, diversamente inseriti, potrebbero individuare completamente i tre sistemi simmetrici, equivalenti al sistema considerato.

* * *

10. - Se ogni problema di misura industriale può dunque dirsi oggi bene risolto in linea tecnica e qualitativa, qualche ombra sul quadro possono gettare talune considerazioni quantitative.

Infatti, mentre gli strumenti industriali per il controllo tecnico del funzionamento delle macchine e degli impianti assicurano in generale precisione più che soddisfacente; mentre gli strumenti portatili, così detti di precisione, consentono, bene usati, e frequentemente verificati, quei limiti di approssimazione di $\pm$ 0,5 % che rappresentano le colonne di Ercole delle misure tecniche odierne; non si può dire invece che le misure di energia si possano oggi fare sempre con quella esattezza che sarebbe imposta dalla loro importanza economica. Non si parla qui degli ordinari contatori installati presso le miriadi dei piccoli utenti, per i quali i frequenti errori di 3 $\div$ 5 % non hanno grande importanza. Ma vi sono oggi molte grandi forniture di energia elettrica di società a società, che rappresentano annualmente valori di parecchi milioni di lire, e nelle quali, quindi, un errore di qualche percento può facilmente rappresentare un centinaio di migliaia di lire dato o ricevuto indebitamente ogni anno. Si entra così in un campo nel quale il criterio tecnico che dà importanza solo all'errore relativo, deve necessariamente cedere un po' il passo al criterio contabile, che valuta solo l'errore assoluto.

Ora gli ordinari contatori ad induzione, nonostante i veri prodigi in essi compiuti, di cui già abbiamo fatto cenno, sono assolutamente inadeguati a forniture di questa importanza che si svolgono in generale in condizioni di tensione, di frequenza e di fattore di potenza assai variabili. E si ricorre, dato che anche i contatori a pendoli non sembrano scevri da inconvenienti, alla integrazione dei diagrammi dei wattmetri registratori, snaturando il carattere di questi strumenti, senza tuttavia migliorare grandemente la situazione ed aggiungendo nuove cause di errore e di discussione.

È doveroso però aggiungere subito che il problema del contatore di precisione o, in generale, della misura esatta di ingenti quantità di energia elettrica, è piuttosto un problema economico che tecnico. Non mancano studi al riguardo ed è certo che ricorrendo a comparatori o a sistemi di integrazione frazionata si potrebbero già ottenere risultati assai soddisfacenti; come probabilmente potrebbero ottenersi anche studiando un tipo di contatore ordinario, con criteri diametralmente opposti a quelli normalmente seguiti. E, per quanto riguarda i riduttori, che hanno pure la loro parte di responsabilità nell'errore complessivo, è senza dubbio possibile un sensibile miglio-

Digitized by Google

ramento nelle loro caratteristiche quando non si ponga in prima linea l'economia della costruzione (e salvo qualche limitazione di cui diremo più avanti per le altissime tensioni). Ridotte le variazioni degli errori entro limiti ragionevoli è poi facile compensare l'errore medio risultante.

Si può quindi asserire che la soluzione sia matura ; occorre solo che gli industriali direttamente interessati nella questione, si convincano della convenienza di pagare quanto è necessario gli organi destinati a misure economicamente tanto importanti.

* * *

11. - Nei riguardi del campo di impiego dei diversi strumenti industriali di misura, ben poche e lievi sembrano le limitazioni.

Per i limiti inferiori, ovviamente è oggi possibile avere voltmetri, amperometri, wattmetri e contatori di portate piccolissime quali solo eccezionalmente possono incontrarsi nelle pratiche applicazioni. Nei riguardi dei limiti superiori giova distinguere ancora correnti continue e correnti alternate. Per le prime l'uso degli shunt consente teoricamente la misura d'intensità illimitate, ancora in condizioni soddisfacenti nei riguardi dell'energia dissipata, data la disponibilità di buoni strumenti indicatori richiedenti pochi centesimi di volt ai morsetti. Inoltre per intensità eccezionali, si può fare uso, se è lecito dire, di un trasformatore di corrente che meglio può definirsi comparatore elettromagnetico. Attorno al fascio di sbarre che porta l'intensità da misurare, si dispone un anello di ferro munito di un avvolgimento secondario con un grande numero M di spire. Il flusso indotto dalla corrente da misurarsi I_x nel nucleo magnetico può essere annullato inviando nel circuito secondario una opportuna corrente continua I_a fornita da sorgente ausiliaria. Un indicatore di flusso nullo indica la condizione di equilibrio raggiunto, per la quale sarà ovviamente $I_x = M I_a$.

Per le tensioni, senza nessuna difficoltà tecnica (data l'assenza delle correnti di capacità) ma solo con le cautele costruttive rese necessarie dall'alta tensione, si possono costruire i voltmetri necessari alla misura delle alte tensioni continue, che potrebbero generalizzarsi il giorno in cui, risolto veramente il problema della conversione, si ritornasse per le grandi trasmissioni, al sistema Thury.

Con le correnti alternate i trasformatori di misura permettono evidentemente di estendere comunque i limiti delle misure ; ma le difficoltà non sono del tutto trascurabili quando si vada oltre i 20 ÷ 30 mila ampere ed oltre i 100.000 volt ; difficoltà costruttive, ma, sopratutto, di controllo.

Per le fortissime intensità il problema, che ha già trovato alcune ingegnose soluzioni, non ha oggi una grandissima importanza perchè simili enormi correnti si incontrano solo negli impianti di forni elettrici, dove, in generale, è possibile e conviene riportare le misure sul primario dei trasformatori che li alimentano. Più importante e più grave è il problema dei riduttori di tensione per le tensioni primarie di 100 e di 200 kilovolt che diventano sempre più comuni. Costruttivamente il problema può essere solo economico, chè non sembra difficile, nonostante la maggiore importanza delle dispersioni, progettare riduttori con errori di rapporto e di fase accettabili ; ma la determinazione sperimentale di tali errori si presenta assai ardua. Non si può pensare evidentemente ad una verifica diretta perchè le correnti di capacità cagionate dalle resistenze all'uopo necessarie, maschererebbero completamente il fenomeno in osservazione (1). E in una prova indiretta, fatta coi criteri ordinari, per cui si deve alimentare il riduttore dal secondario, le capacità verso massa e tra spire del primario e quelle dei terminali falserebbero completamente i risultati. Il problema è oggi studiato da molte parti e si finirà certamente col trovare qualche soluzione soddisfacente ; ma doveva essere qui esplicitamente ricordato come uno dei più importanti oggi sul tappeto.

* * *

12. - Il problema ora ricordato si ricollega strettamente con quello già più volte accennato della costruzione e del controllo di *resistenze ohmiche pure*, che interessa, come si è visto, non solo la tecnica delle alte frequenze, ma tutte le misure elettriche.

Poichè non è possibile concepire un circuito elettrico qualsiasi che non abbia induttanza propria o capacità, il problema si riduce a quello di realizzare una disposizione in cui induttanza e capacitanza si compensino esattamente. La teoria può servire di guida fino ad un certo punto e per via teorica si è giunti infatti alla realizzazione di quei tipi di resistenze che si chiamano non reattive. La loro costruzione è infatti possibile solo in quei casi nei quali l'analisi può assicurare che la resistenza equivalente con corrente alternata di elevata frequenza non differisce apprezzabilmente da quella ohmica misurabile con corrente continua. Ciò accade solo con resistenze dell'ordine delle decine o delle centinaia di ohm, costruite con fili di piccola sezione. Al di sotto e al di sopra di tali limiti le difficoltà crescono assai rapidamente e per superarle sembrerebbe necessario trovare qualche nuovo metodo assoluto di misura della costante di tempo. Non mancano infatti sensibilissimi metodi di confronto che permettono di svelare differenze anche minime fra le costanti di tempo di due resistenze simili (gli errori sistematici degli apparecchi e degli strumenti usati possono essere eliminati con dei sistemi di doppie letture e simili) ; ma per essi bisognerebbe disporre di almeno una resistenza pura. Nè è possibile, procedendo per successivi confronti, assumere come resistenza pura quella che dà la minima costante di tempo, perchè la variazione dell'angolo di fase è continua, passando dalle resistenze prevalentemente induttive a quelle prevalentemente capacitive, cosicchè si sarebbe condotti, coll'accennato processo, a ritenere come pura la resistenza più capacitiva di tutte.

(1) Non si considera la possibilità del confronto con un trasformatore campione perchè le difficoltà si trasporterebbero evidentemente tutte nella verifica del campione.

Digitized by Google

Due soli metodi, per quanto ci consta, oggi permettono di risolvere parzialmente il problema, ma sembrano entrambi piuttosto delicati. Quello del Bureau of Standards per le piccole resistenze (shunt) consiste nel paragonare le costanti di tempo di un dato shunt *di rame* a diverse temperature. Potendo ogni volta misurarne la resistenza con corrente continua, si può dedurre il valore costante della reattanza.

Il metodo presume naturalmente che siano trascurabili le perdite addizionali nella massa degli shunt, alla frequenza a cui si adoperano.

L'altro metodo recentissimo (1) dovuto al Prof. G. Vallauri, si basa su una ingegnosa applicazione del tubo di Braun come rivelatore di coincidenza di fase ; ma esso sembra per ora applicabile solo a grandi resistenze o che comunque possano tollerare ai loro morsetti tensioni piuttosto elevate. Ad ogni modo la via sembra aprirsi ed è sperabile che il problema veramente fondamentale per le misure possa in un avvenire non lontano venire risolto.

(1) Vedasi *L'Elettrotecnica* del 15 gennaio 1927.

* * *

Quanto a fare profezie a più lunga scadenza sull'avvenire delle misure elettriche, non è evidentemente possibile. Assai probabilmente il secondo centenario della morte di Volta troverà il mondo, nei riguardi della tecnica e dell'utilizzazione delle energie naturali, ancora più fantasticamente progredito di quello che oggi può apparirci in confronto del secolo scorso. La legge del progresso tecnico scientifico è certamente più che lineare e, salvo non augurabili crisi o catastrofi mondiali, la profezia dovrebbe facilmente avverarsi. Ma nulla è dato prevedere circa l'indirizzo dei futuri progressi scientifici. Ora la tecnica delle misure non può essere fine a sè stessa. Essa è l'ancella preziosa delle altre tecniche che le indicano le vie da affrontare, i problemi da risolvere. Quello che però si può affermare è che oggi, dopo un secolo dalla morte di Volta, le misure in genere e le elettriche in ispecie, per lo sviluppo e la perfezione raggiunta, rappresentano un'arma formidabile per il futuro progresso tecnico scientifico, verso qualunque direzione esso debba dirigersi.

Digitized by Google

Digitized by Google

Ing. Prof. ALBERTO DINA

R. SCUOLA DI INGEGNERIA DI PALERMO

LA PRODUZIONE INDUSTRIALE DELLA CORRENTE ELETTRICA

Digitized by Google

Digitized by Google

1. – *Gli inizi della produzione industriale dell'energia elettrica.*

L'energia elettrica si può produrre per trasformazione di tutte le altre forme di energia; in ordine cronologico vennero utilizzate a tale scopo l'energia chimica nelle pile voltaiche, la termica nelle pile termoelettriche, la meccanica nelle dinamo. La seconda di queste trasformazioni presentò soltanto interesse teorico, la prima ebbe importanti applicazioni nelle tecnica delle correnti deboli (telegrafi, ecc.) per la quale la questione dell'economia è secondaria, la terza infine — la sola che permetta di generare l'energia elettrica a buon mercato — diede luogo alla tecnica delle correnti forti, cioè alla produzione industriale dell'energia elettrica.

Questa ebbe la sua origine prima — sessantasei anni dopo la mirabile scoperta di Volta — nella celebre «macchinetta elettromagnetica» di Pacinotti (1865), da lui ideata contemporaneamente come motore e come generatore, e trovò un potente impulso nella facilità con cui questa forma di energia si può trasportare a distanza e nelle grandiose applicazioni a cui può dar luogo la sua trasformazione inversa in energia meccanica, termica o chimica. Al suo impiego principale, la distribuzione di luce e di forza motrice, contribuirono specialmente la reversibilità delle dinamo trovata fin dall'inizio, l'invenzione di Edison della lampada a incandescenza (1878), l'introduzione dei trasformatori per la prima volta sperimentati da Gaulard e Gibbs all'esposizione di Torino del 1884, e la geniale invenzione di Ferraris dei motori a campo rotante (1885) i quali nella forma industriale che assunsero diedero luogo alla più brillante soluzione della distribuzione di forza motrice.

La produzione di energia elettrica per illuminazione precedette di circa un decennio quella per forza motrice e venne inizialmente attuata mediante centrali termiche sorgenti nella zona stessa di distribuzione; la prima in Europa fu messa in esercizio nel 1883 dalla Società Edison a Milano. Successivamente l'obbiettivo di una produzione più economica della corrente e il suo uso per forza motrice furono di sprone alla costruzione delle centrali idrauliche lontane dal luogo di utilizzazione e delle relative linee di trasporto di forza; fra i primi impianti idroelettrici di carattere industriale si rammentano come esempi di vera audacia tecnica ai tempi in cui furono costruiti quelli — rispettivamente a corrente continua, alternata monofase e trifase — che servirono alla trasmissione di energia da Isoverde a Genova (1889), da Tivoli a Roma (1892), da Paderno a Milano (1898).

L'incessante e rapidissimo progresso nella produzione e nell'utilizzazione della corrente elettrica è dovuto non soltanto ai sommi che con lampi di genio aprirono nuove strade in questo campo, ma ben anche all'eletta schiera di ingegneri scienziati che diedero forma pratica alle idee dei pionieri e raggiunsero nella costruzione del macchinario e degli impianti perfezionamenti tecnici ed economici tali che — prima della loro realizzazione — sarebbe sembrato quasi follia sperare.

Non soltanto il passaggio da un tipo già ben studiato a un tipo nuovo, ma ben anche ogni variazione in una sola proprietà di una macchina obbliga spesso alla soluzione di ardui problemi, perchè disturba un equilibrio già faticosamente trovato e sottopone il costruttore al compito di raggiungere un nuovo razionale equilibrio fra le proprietà elettriche, meccaniche ed economiche armonizzandole fra loro; la soluzione più opportuna — quella cioè che meglio concilia le opposte esigenze — si nasconde il più delle volte fra una serie di combinazioni e di compromessi. E tuttavia essa pure, ad onta di tutte le fatiche spese per arrivarvi, riesce di corta vita perchè nello stesso istante in cui nasce diventa il punto di partenza per nuovi sforzi diretti alla ricerca di una costruzione migliore!

Per dare un'idea dei risultati economici a cui può portare un simile diuturno lavoro, del quale non sempre si apprezza al giusto valore la importanza, vengono messi a raffronto nella seguente tabella i pesi di macchine e trasformatori costruiti colle stesse caratteristiche nel 1900 e nel 1920.

	DATA DELLA COSTRUZIOME			
	1900	1920	1900	1920
	Peso totale in kg.		Confronto in % fra i pesi	
Generatore 3000 kVA, 83 g/m.	127.000	71.000	100	56
Motore 200 HP, 187 g/m. :	10.000	4.200	100	42
Trasformat. in olio 1200 kVA	18.000	7.550	100	41,5

Digitized by Google

Come si vede, in quel ventennio, al principio del quale i tipi esaminati avevano già raggiunto un notevole grado di perfezione, i loro pesi vennero nel complesso per lo meno dimezzati.

2. - *La generazione idraulica della forza motrice.*

La produzione idraulica dell'energia elettrica ha permesso lo sfruttamento di risorse naturali che altrimenti sarebbe stato difficile o magari impossibile di utilizzare. Naturalmente si cominciò dalle forze d'acqua più vicine alle grandi città, che diedero luogo ad impianti di pianura a grande portata e piccolo salto; a questi ne seguirono altri su fiumi più lontani; ultimi vennero quelli di montagna — con caratteristiche opposte ai primi — la cui efficienza fu spesso di gran lunga aumentata coll'ausilio di serbatoi. — Mediante il collegamento elettrico delle loro linee, impianti su corsi d'acqua a diverso regime di magre e di piene, centrali idrauliche e centrali termiche possono facilmente collaborare e integrarsi a vicenda con vantaggio economico e maggior sicurezza nell'esercizio complessivo.

Gli impianti idroelettrici, col crescere della distanza e della potenza trasmessa, richiesero tensioni di linea di mano in mano sempre maggiori. Essi ebbero inoltre una notevole influenza sullo sviluppo di altri rami della tecnica: la costruzione delle grandi motrici idrauliche e delle condotte forzate per alte pressioni. A loro altresì è andata sovente congiunta la regolazione idraulica di intiere vallate, come pure l'irrigazione di zone pianeggianti a cui l'acqua viene fornita dopo essere stata utilizzata nel dislivello montuoso per la produzione di energia elettrica. Infine essi hanno reso possibile la vita ad alcune industrie che, per prosperare, abbisognano di notevoli quantità di energia elettrica a prezzo bassissimo; ad es. qualche industria per la fissazione dell'azoto atmosferico si accontenta dell'energia di supero, cioè di quella eccedente di notte e nei periodi di piena in impianti idroelettrici senza serbatoi, energia che può venir venduta a speciali condizioni di favore.

Negli impianti idrici la determinazione della potenza complessiva del macchinario, di quella delle singole unità nonchè del loro numero di giri è fondata sulle caratteristiche della forza d'acqua da sfruttare, sicchè non si ha quella libertà di scelta che, almeno in certa misura, si gode negli impianti termici.

Per le basse e medie cadute si impiega la turbina Francis, nel primo caso di solito ad asse verticale, per le alte la Pelton; però il prof. Belluzzo preconizza l'impiego di turbine Francis anche per grandi salti, eventualmente con interposizione di ingranaggi riduttori di velocità fra la turbina e l'alternatore quando l'accoppiamento diretto delle due macchine desse luogo ad un numero di giri troppo alto per la seconda.

A quei tipi usati da tempo si è aggiunta da circa un decennio la turbina Kaplan su cui, in vista della sua minore notorietà, vale la pena di spendere qualche parola. Il distributore è analogo a quello della Francis; la girante è invece provvista di poche pale radiali (2 a 6) non ricoprentisi fra loro, ed è disposta rispetto al primo nel tubo di aspirazione in modo che l'acqua, nello spazio intermedio fra l'uno e l'altra, può liberamente deviare di 90°; inoltre le pale della girante possono essere mobili e disporsi automaticamente tutte ad un tempo sotto un angolo opportuno rispetto alle palette del distributore. Questa costruzione rende la turbina adatta per cadute molto basse, perchè in tali casi — a parità di caduta e di potenza — permette di raggiungere un numero di giri da doppio a triplo della Francis con corrispondente risparmio di spazio e di costo nel generatore elettrico; essa inoltre presenta, in misura ancor più spiccata che la Francis, i vantaggi di una piccola sensibilità a variazioni di salto e di un ottimo rendimento, non solo a carico normale ma, in seguito alla regolazione automatica della posizione delle pale, anche a carichi parziali perfino assai ridotti. La turbina elicoidale con pale ricoprentisi e fisse tipo Lawaczeck, pure adatta per basse cadute, è più economica della Kaplan, ma il suo rendimento, altrettanto alto a carico normale, diminuisce assai più rapidamente a carichi parziali, epperò in un impianto a piccolo salto, in cui la potenza complessiva si suddividesse in parecchie unità, converrebbe scegliere la maggior parte di esse di questo tipo, alcune o magari una soltanto del tipo Kaplan. Appunto a tali concetti si ispira il moderno impianto di Lilla Edet (Svezia) pel quale vennero ordinate due turbine Lawaczeck ed una Kaplan che funziona dal 1925 con ottimi risultati. Ciascuna di esse presenta le seguenti caratteristiche: 10.000 HP; 62,5 giri/min.; 6,5 m. di salto; le loro giranti hanno gli enormi diametri rispettivamente di 6 e di 5,8 m., i maggiori di tutte le turbine del mondo.

I regolatori delle turbine possono — sia pure raramente — non funzionare, p. es. per scarrucolamento della cinghia di comando; più spesso accade che un corpo estraneo si insinui fra le palette mobili del distributore impedendone la chiusura. Per queste ragioni le giranti di una turbina e del generatore elettrico ad essa accoppiato si sogliono calcolare in modo da resistere alla velocità di fuga che, a seconda dei tipi, può riuscire uguale a circa 1,8 — 2 — 2,7 la normale, quantunque mediante dispositivi di sicurezza variabili da caso a caso (quali ad es. chiusura rapida della paratoia nel canale di arrivo, deviazione del getto indipendentemente dal regolatore ordinario) quei rapporti possano venire sensibilmente ridotti. Affinchè poi l'inerzia delle masse rotanti moderi le variazioni di velocità che, variando il carico, si verificano prima che il regolatore riesca ad aumentare o a diminuire in grado opportuno l'accesso dell'acqua, occorre che il momento di girazione (GD^2) del generatore nonchè di un eventuale volano (per macchine a corrente continua) non sia al disotto di un valore determinato. Entrambe queste circostanze concorrono ad imporre costruzioni robuste per le giranti degli alternatori accoppiate a turbine idrauliche e portano quindi a un peso abbastanza elevato per kVA.

Digitized by Google

3. - *La generazione termica della forza motrice.*

Fra gli impianti termici i principali sono a vapore. Questi si costruivano un tempo in vicinanza del luogo di consumo, avuto però riguardo anche all'approvvigionamento del carbone e dell'acqua per la condensazione e al costo del terreno. Recentemente però, per risparmiare nelle elevate spese di trasporto, si sono costruiti grandi impianti di questa classe anche a rilevante distanza dalle città e in vicinanza invece a miniere di carbone, adottando in conseguenza per la trasmissione dell'energia tensioni molto alte, raggiunte prima solo per impianti idroelettrici (ad es. la centrale Goldenberg in Vestfalia con linee a 220.000 Volt).

Caldaie a vapore. - Per generare il vapore si possono adoperare svariati combustibili solidi, liquidi o gasosi; i più comunemente usati sono però il carbone, la lignite e la nafta. La lignite è un combustibile di basso potere calorifico, sicchè può venire usata con convenienza solo in impianti abbastanza vicini ai giacimenti. La nafta, dal punto di vista dell'economia del consumo, è più opportuno che sia bruciata in un Diesel che non in una caldaia separata dalla motrice, però può essere utilmente impiegata per semplificare l'esercizio di un impianto a vapore già esistente. Le caldaie a combustione di carbone sono quelle maggiormente impiegate, e per esse i progressi realizzati negli ultimi anni riguardano l'aumento di potenzialità delle singole unità, l'aumento della pressione e della temperatura del vapore, modificazioni apportate per ottenere un miglior rendimento fra cui importantissima la combustione di carbone polverizzato.

Una dozzina d'anni fa veniva considerata già come grande unità una caldaia di 500 m.^{2} di superficie di riscaldamento; ormai invece si sono sovente oltrepassati di parecchio i 2.000 m.^{2} Naturalmente grandi caldaie vengono adoperate solo in impianti di notevole importanza, e semprechè il carico, anche nelle ore in cui è molto basso, sia sufficiente per un loro funzionamento con buon rendimento. Esse allora presentano, rispetto a un gruppo di caldaie più piccole di ugual potenzialità complessiva, i vantaggi di una maggiore semplicità d'impianto, di richiedere minore spazio, di dar luogo a minori perdite per irradiamento e quindi a un migliore rendimento.

All'aumento di potenzialità delle caldaie contribuì potentemente l'uso abbastanza recente della combustione di carbone finemente polverizzato soffiato nel focolaio mediante ugelli, perchè nei focolai a griglia difficilmente si potevano superare certi limiti di grandezza. L'uso della polvere permette di impiegare carbone di qualità inferiore, di regolare facilmente la produzione del vapore variando la quantità di combustibile, di migliorare il rendimento mediante il più intimo miscuglio coll'aria, di diminuire la perdita per materiale incombusto passante nella cenere, di ridurre al minimo il consumo di carbone durante le pause dell'esercizio. Talvolta si adopera un sistema misto in cui l'accensione e la combustione di carbone scadente sulla griglia viene facilitata dalla fiamma della polvere, mentre a sua volta la formazione di questa è favorita dalla presenza del carbone già ardente sulla griglia.

Mentre un tempo si preriscaldava l'acqua di alimentazione facendola in ogni caso circolare in economizzatori lambiti dai gas caldi prodotti dalla combustione, attualmente nei grandi impianti si preferisce di ottenere tale preriscaldamento con più alto rendimento termico mediante il vapore di scarico o meglio mediante vapore intermedio, mentre il fumo viene utilizzato per riscaldare l'aria che si immette nel focolaio. Questo metodo però, mentre è applicabile in tutta la sua estensione ai focolai per carbone polverizzato, lo è solo parzialmente a quelli a griglia perchè questa pone dei limiti alla temperatura della aria soffiata. La tendenza odierna è di generare il vapore a pressioni molto alte (di solito fino a 35–40 atm.) e di surriscaldarlo fino a circa 400° per diminuire il consumo di vapore nelle turbine. Questo vantaggio cresce più lentamente coll'ulteriore aumento della pressione, la quale però in alcuni impianti arriva al centinaio di atmosfere, p. es., nella centrale di Lakeside (100 atm. in una Stirling da 2650 m.^{2}) e in quella di Milwaukee (98 atm. in una Babcock e Wilcox pure da 2650 m.^{2}).

Ad una pressione di gran lunga superiore si giunge poi in una caldaia di tipo recentissimo, la Benson. Per quanto non siano ancor noti pubblicamente tutti i particolari della sua costruzione e del suo funzionamento, sembra che essa sia adatta per la produzione di grandi quantità di vapore in una sola unità. L'acqua, spinta in elementi tubolari fortemente riscaldati, vi passa pressochè istantaneamente allo stato di vapore, venendo questo prodotto alla temperatura e alla pressione critica. Le prime prove furono eseguite da Benson a Rugby nel 1924; un secondo impianto entrò in funzione nel 1925 nella Centrale delle Officine Siemens-Schuckert a Berlino. In questo il vapore, generato a circa 224 atm. 374°, e poscia surriscaldato, serve, dopo essere stato ridotto alla pressione di 100 atm., all'alimentazione di due turbine, ciascuna da 1.000 kW. Altri tentativi nello stesso senso vennero eseguiti da Overwyn in S. Francisco.

Macchine a stantuffo e turbine a vapore. - Le prime possono oggidì entrare in concorrenza colle seconde solo per potenze relativamente piccole, fin verso i 500 kW se adoperate senza ricupero, fino a una potenza da doppia a tripla se adoperate con ricupero, cioè con utilizzazione per altre industrie (fabbriche di birra, filature, tintorie, cartiere, ecc.) del vapore di scarico o del vapore intermedio fra i cilindri ad alta e a bassa pressione. Vengono preferite le macchine verticali quando il terreno è caro, altrimenti le orizzontali che sono più comode nell'esercizio.

In luogo di macchine a vapore con caldaie separate vengono talvolta usate con vantaggio le locomobili, specialmente in impianti con spazio limitato o di carattere provvisorio.

Per i gruppi elettrogeni azionati da macchine a

Digitized by Google

stantuffo, siano esse a vapore o di altra natura, è nenecessario che il momento di girazione del sistema rotante — un eventuale volano incluso — assuma un valore rilevante, dovendo la velocità durante un giro venire uniformata entro limiti tali che non vi siano oscillazioni sensibili della tensione, e quindi di luce nelle lampade a incandescenza, e sia garentito un regolare parallelo riuscendo sufficientemente diverso il periodo di libera oscillazione del sistema rotante e quello delle oscillazioni forzate dovute al movimento alternativo dello stantuffo. A questa condizione si può per le macchine a vapore soddisfare di regola facendo il primo periodo maggiore del secondo mediante un volano sufficientemente grande; invece per i Diesel e i motori a gas questo — se scelto in base allo stesso criterio — diverrebbe spesso così pesante che si preferisce allora far sì che il periodo di libera oscillazione sia intermedio fra il periodo dell'oscillazione forzata fondamentale e quello della sua seconda armonica cioè di doppia frequenza.

Non soltanto lo scopo di ottenere un rilevante $G D^2$, ma anche il basso numero di giri a cui spesso si scende colle motrici a stantuffo porta a dare agli alternatori ad esse direttamente accoppiati la cosidetta forma volano, cioè a sistema induttore di grande diametro, tale che sia sufficiente per allogarvi i numerosi poli — di dimensioni adeguate alla potenza — che corrispondono alla frequenza normale, sicchè uno speciale volano di regola non è necessario; questo invece si usa pei generatori a corrente continua, salvochè non si adotti anche per loro il tipo volano a poli interni come si è fatto in qualche caso recente.

La motrice termica più diffusa nei grandi impianti, potendosi costruire per potenze rilevantissime, è la turbina a vapore, che si cominciò a introdurre circa 24 anni fa. Essa, specialmente se di grande potenza, presenta molti vantaggi rispetto alla macchina a stantuffo: peso e dimensioni minori e in conseguenza minor costo per le fondazioni e l'edificio, minor consumo di vapore sopratutto per la sua capacità di sfruttare i più alti vuoti nel condensatore, costanza di tale consumo anche dopo un lungo esercizio, più facile messa in marcia e più semplice condotta. L'acqua di condensazione, non contenendo olio, può venire adoperata senza depurazione per alimentare la caldaia; per la stessa ragione l'uso del vapore di scarico e del vapore intermedio è più comodo che per la macchina a stantuffo. La turbina inoltre ha una marcia molto uniforme, sicchè nei gruppi elettrogeni non dà luogo a oscillazioni di tensione nè a difficoltà per il parallelo e non ha quindi alcuna speciale esigenza riguardo al momento di girazione del generatore. La regolazione della sua velocità è facile; oltrechè del regolatore ordinario per strozzamento di vapore la turbina è sempre fornita di un regolatore di sicurezza montato sul suo albero, che intercetta l'arrivo del vapore quando il numero di giri supera del 10% il normale e funziona oggidì in modo così perfetto che la prova di resistenza alla forza centrifuga per il gruppo elettrogeno si suole eseguire, invece che alla velocità di fuga, a una velocità che supera solo del 25 % la normale. A lato dei numerosi vantaggi la turbina presenta però uno svantaggio notevole, cioè quello di un elevato consumo specifico ai bassi carichi.

Per godere anche per potenze inferiori ai 500 kW dei vantaggi che questo tipo di motrice presenta rispetto a quella a stantuffo, si costruiscono pure piccole turbine che però, contenendo tutti gli elementi delle grandi, devono essere di esecuzione assai accurata e riescono quindi piuttosto costose.

Motori a combustione interna. – I motori Diesel hanno ormai raggiunto una grande perfezione costruttiva e fino alla potenza di qualche migliaio di kW possono rivaleggiare colla turbina a vapore, naturalmente con maggior successo se il rifornimento di carbone e di acqua presenta delle difficoltà. Inoltre essi vengono usati in grandi impianti come macchine di riserva e per superare la cosidetta punta del diagramma, sopratutto quando la loro proprietà di poter essere avviati rapidamente e caricati subito ha importanza decisiva; altrimenti il loro elevato costo li rende meno raccomandabili per simili applicazioni di breve durata.

Un Diesel è adatto specialmente per un esercizio tranquillo ed uniforme, potendo in generale sopportare soltanto sovraccarichi transitori e di picccola entità (di solito fino al 10 – 15 %). La superficie occupata è di poco superiore a quella di una macchina a vapore a stantuffo, però naturalmente di gran lunga inferiore se nel confronto si tien conto anche della caldaia.

I motori a gas povero, a gas luce, a petrolio ecc., si costruiscono solo per potenze relativamente piccole, mentre i grossi motori a gas presuppongono per il loro uso l'esistenza di speciali industrie (fabbricazione della ghisa, preparazione del coke) ed hanno lo scopo di adoperare per la produzione dell'energia elettrica un combustibile (gas di alto forno, gas dei forni a coke) che altrimenti andrebbe perduto.

4. – *I generatori elettrici.*

Un generatore elettrico può venir comandato dalla sua macchina motrice indirettamente mediante cinghia (fino a un centinaio di kW) o ingranaggi, oppure per accoppiamento diretto mediante giunto elastico o rigido; per le maggiori potenze si usa sempre l'attacco rigido a flange.

Recentemente sono venuti in favore per turbine a vapore di piccola e media potenza (da una cinquantina a parecchie migliaia di kW) gli ingranaggi a dentatura elicoidale a freccia od anche semplice; con questi ultimi la marcia è più tranquilla, però la spinta assiale deve venire equilibrata dai supporti. Questa connessione meccanica ha lo scopo di far marciare la turbina a un numero molto alto di giri ed il generatore più lentamente; per la prima si raggiungono così i vantaggi di un minor consumo di vapore e di una costruzione più semplice con peso e dimensioni ridotte, per il secondo quello che, invece di un turbogeneratore, si può usare una macchina di tipo normale, di minor costo e miglior rendimento.

Tali ingranaggi riduttori si usano sia per alter-

Digitized by Google

natori (in ispecie poi quando — essendo la frequenza di questi inferiore a 50 per./s., p. es. 25 o 16 e $^2/_3$ — la turbina ad accoppiamento diretto dovrebbe marciare ad un numero di giri relativamente basso), sia per dinamo a corrente continua nella cui costruzione per grandi velocità si incontrano ancora difficoltà sensibili se la potenza supera i 500 kW.

Infine gli ingranaggi si adoperano anche in unione a turbine idrauliche, tanto come riduttori allo scopo di sostituire a turbodinamo delle dinamo per velocità normale, quanto come moltiplicatori per passare da basse ad alte velocità, il che talvolta è consigliabile per gruppi turbina-alternatore ad asse verticale.

Fra i generatori a corrente continua, quello ad eccitazione in serie è caduto in disuso. Fra le poche applicazioni che del resto ha avuto, particolarmente interessante fu quella della trasmissione dell'energia a distanza con corrente continua ad alta tensione, realizzata da Thury, con inserzione in serie di parecchie dinamo. Il più importante esempio di questo metodo si trova nell'impianto di Lione con tensione fino a 100.000 V., che in un ampliamento già previsto si porterà a 300.000 V. mettendo allora a terra un punto del circuito.

Attualmente sembra però che il problema in discorso potrà venire risolto anche mediante conversione di corrente trifase in continua. Un passo importante in questa direzione fu fatto da Calverley e Highfield col loro transvertitore da 2000 kW presentato all'esposizione di Wembley nel 1924, il cui principio fondamentale è in poche parole il seguente: Esso è costituito da una parte statica e da una parte analoga a un'ordinaria convertitrice; la prima consta di un complesso di trasformatori trifasi i cui primari e secondari sezionati sono disposti sui nuclei in modo da dar luogo nelle varie sezioni secondarie ad un sistema di numerose f. e. m. uguali ed ugualmente sfasate. Questi elementi vengono riuniti in serie, formando un avvolgimento chiuso con connessioni ad altrettante lamine di un commutatore fisso. Il valore massimo della tensione fra due punti diametralmente opposti — che è di grandezza costante — gira nello spazio alla velocità sincrona, sicchè è possibile ricavare una tensione continua per mezzo di due spazzole rotanti a quella velocità sul commutatore. Nel transvertitore di Wembley, dotato di dieci commutatori, la tensione era di 10.000 V. fra le spazzole di ciascuno di essi e quindi complessivamente di 100.000 V.

La dinamo eccitata in derivazione è il generatore a corrente continua più comunemente usato. Essa s'impiega principalmente in impianti a carico pressochè costante o variabile in modo graduale, come quelli per distribuzione di luce e di forza, o da sola o — come di regola nelle maggiori centrali — in parallelo ad una batteria di accumulatori a numero regolabile di elementi, la quale contribuisce alla costanza della tensione, diminuisce la potenza del macchinario richiesto, garantisce una maggiore sicurezza ed economia di esercizio. Però la dinamo in discorso può venire adoperata anche in impianti che subiscono forti e continue variazioni di carico (trazione, laminatoi, ecc.) purchè in parallelo ad una batteria a repulsione o tampone — a numero costante di elementi — la quale con opportuni artifici (metodo di Pirani, ecc.) viene costretta ad entrare prontamente ed energicamente in azione quando il carico varia, mentre la dinamo continua a marciare in condizioni normali. Per questo secondo caso si presta bene anche la dinamo compound senza l'ausilio di accumulatori. In distribuzioni a tre fili, se non si impiega un generatore per ciascun ponte, la dinamo in derivazione si usa o sola, ma allora con costruzione appropriata alla divisione della tensione (dinamo Dobrowolsky, ecc.), oppure in unione ad altre macchine ausiliarie o a batterie aventi lo stesso scopo.

I generatori a corrente continua — salvo casi speciali — si costruiscono attualmente del tipo corazzato con poli addizionali, ad indotto rotante interno con avvolgimento a tamburo. La massima potenza per essi raggiunta supera di poco i 6.000 kW, la massima tensione arriva a 5.000 Volt.

Speciali difficoltà ha offerto la costruzione delle turbodinamo. Nel loro induttore si applicano spesso ad un tempo e un avvolgimento di compensazione per equilibrare il campo trasverso ed interpoli per facilitare la commutazione, che in causa della breve durata del corto circuito delle bobine sotto alle spazzole si presenta in condizioni sfavorevoli. Fra le particolarità costruttive del loro indotto allungato basti ricordare che le testate dell'avvolgimento sono tenute in posto da robuste cappe di bronzo e che il commutatore, cerchiato con anelli di acciaio, è raffreddato mediante canali assiali di ventilazione o connessioni delle sue lamine nella zona mediana a foggia di alette di ventilatore. La tendenza moderna però è — come si è già visto — di sostituire alle turbodinamo, al di là di una certa potenza, dinamo di velocità normale comandate da ingranaggi.

Salvochè in certi rami d'industria in cui l'uso di corrente continua è indispensabile o preferibile (quali rispettivamente le applicazioni elettrolitiche, la trazione tramviaria), essa è andata di mano in mano cedendo il posto alla corrente alternativa e specialmente alla trifase, che è più vantaggiosa della monofase sia in virtù delle ammirabili proprietà dei motori a campo Ferraris sia anche per il minor costo dei generatori e del rame nella linea. In quanto segue ci occuperemo quindi soltanto della produzione di corrente alternativa.

Gli alternatori sono ad albero orizzontale, salvo quelli ad ombrello accoppiati a turbine per basse cadute; il loro induttore, di regola interno e rotante, è fornito di poli sporgenti eccetto nei turboalternatori. Per questi si adotta ormai generalmente l'induttore cilindrico ad eccitazione ripartita introdotto da Brown, che è costituito o mediante un aggregato di lamierini sottili o di grosse piastre di ferro di grande permeabilità oppure da un cilindro pieno di ottimo acciaio fucinato in un sol pezzo coll'albero, costruzione questa che garantisce nel modo migliore l'omogeneità del materiale. Su numerose questioni interessanti la costruzione degli alternatori, ed in ispecie di quelli moderni di rilevante potenza, ritorneremo in un altro paragrafo ad esse dedicato.

Digitized by Google

Qui faremo cenno soltanto di due problemi che si sono presentati già da molto tempo e cioè la regolazione automatica della tensione e le oscillazioni pendolari.

Uno svantaggio dei regolatori automatici di tensione inizialmente usati è quello — di cui del resto sono affetti quasi tutti i meccanismi di regolazione — di incominciare a funzionare solo dopo una certa variazione della grandezza che si vuole mantenere costante. Di solito poi l'effetto, per l'inerzia delle masse, segue lentamente la causa e facilmente oltrepassa il valore a cui si vuol arrivare, che invece si raggiunge solo dopo alcune oscillazioni. Ma, anche se l'inerzia delle masse fosse trascurabile, permarrebbe sempre come ostacolo a una pronta regolazione della tensione l'inerzia magnetica, perchè si tratta di variare la corrente in circuiti di elevata costante di tempo.

L'invenzione dei regolatori rapidi ha eliminato questi inconvenienti. Nel regolatore rapido Tirrill, che ha risolto il problema in modo brillante, due relais — sottoposti l'uno alla tensione dell'alternatore e l'altro a quella della sua eccitatrice — attraverso contatti ed altri relais intermedi chiudono in corto e reinseriscono periodicamente in circuito la resistenza di campo dell'eccitatrice. La corrente di eccitazione oscilla allora attorno a un certo valore medio anche se la tensione dell'alternatore resta costante ; se questa poi muta, varia in senso inverso il valore medio di quella corrente. Il fatto che tale regolatore è attivo anche quando il carico e quindi la tensione dell'alternatore non varia, costituisce il suo pregio speciale, perchè esso, che ha continuamente le sue leve in oscillazione, è in grado di opporsi immediatamente ad ogni minima variazione di tensione.

In estese reti ad alta tensione la regolazione di questa in punti opportuni si può effettuare mediante la variazione dell'eccitazione di motori sincroni ivi installati.

Le oscillazioni pendolari sono libere (o naturali) oppure forzate. Le prime si manifestano di solito alle variazioni di carico in un alternatore — anche se comandato da motrice a coppia costante in un giro — che marcia in parallelo con altri, prevalendo in modo alterno con noto meccanismo l'azione dell'inerzia e della coppia sincronizzante ; il loro periodo dipende appunto dal rapporto fra il momento d'inerzia della girante e la coppia sincronizzante per la deviazione unitaria. In generale queste oscillazioni si spengono rapidamente inquantochè il loro manifestarsi dà luogo a un moto relativo fra il campo rotante generato dalle correnti trifasi d'armatura e la stella polare, ed in seguito ad esso si originano delle correnti indotte — e quindi corrispondenti azioni frenanti — nelle espansioni polari, specie se massicce, o in appositi avvolgimenti smorzatori (Hutin e Leblanc) in esse allogati.

Si sono però osservati dei casi in cui le oscillazioni naturali non solo permangono, ma, pur avendo spesso una causa prima così piccola e di così breve durata da sfuggire all'osservatore ed iniziandosi quindi con minima intensità, possono in breve tempo esaltarsi grandemente, magari al punto da fare oltrepassare alla ruota polare l'angolo limite di stabilità, provocando così la disincronizzazione. La spiegazione di questo fenomeno abbastanza raro, ma che quando si verifica è causa di inconvenienti notevoli, è complicata, sicchè qui basti dire che esso si manifesta solo quando il rapporto fra la resistenza del circuito d'armatura e la sua reattanza supera un certo valore. Anche recentemente esso si produsse nel funzionamento in parallelo della centrale Gressoney la Trinité in Val d'Aosta con un gruppo di centrali della Valtellina ; la causa prima era da attribuirsi a moti vorticosi dell'acqua nei tubi in vicinanza della turbina, ma le oscillazioni pendolari che ne conseguivano erano esaltate dalle caratteristiche della linea poco favorevoli al funzionamento stabile (resistenza troppo grande).

Le oscillazioni forzate od impresse hanno luogo quando la potenza motrice varia in modo periodico durante un giro, come succede nelle macchine a stantuffo ; ad esse corrispondono altresì variazioni periodiche della coppia sincronizzante quando l'alternatore marcia in parallelo con altri. Se il loro periodo coincide con quello delle oscillazioni proprie dell'alternatore (risonanza) od anche solo gli è abbastanza vicino, la loro ampiezza va di mano in mano aumentando e la marcia in parallelo con altri alternatori diventa impossibile. Per ovviare a questo stato di cose si deve aumentare la differenza fra i due periodi di oscillazione. Ciò si raggiunge di solito modificando opportunamente il momento di girazione della parte rotante, come si è visto parlando della macchina a vapore a stantuffo. Può giovare altresì l'inserzione di una bobina di autoinduzione fra l'alternatore e le sbarre collettrici, che, riducendo la corrente e la coppia sincronizzante, fa aumentare il periodo di oscillazione naturale. Anche nei riguardi delle oscillazioni forzate riesce in generale vantaggioso un avvolgimento smorzatore, però non sempre, come mostra un'analisi più dettagliata del fenomeno.

Anche il regolatore di velocità può dar luogo a disturbi (qualunque sia la natura della motrice), anzi rendere perfino impossibile la marcia in parallelo quando il suo periodo di oscillazione naturale riesce prossimo a quello della macchina.

Oltre agli alternatori sincroni di cui ci siamo occupati fin qui, anche l'ordinario motore asincrono gode della proprietà di funzionare come generatore trifase quando, essendo inserito in parallelo con macchine sincrone, viene fatto marciare a velocità superiore a quella di sincronismo. Ed invero il campo viene allora prodotto — come quando la macchina funziona da motore — dalla componente magnetizzante che essa assorbe dalla rete, ma, essendo ora mutato il segno dello scorrimento, cambia la direzione della componente attiva, sicchè la macchina, che riceve energia meccanica, fornisce energia elettrica alla rete.

Questa proprietà fece pensare ad utilizzare il generatore asincrono nella sua costruzione con rotore a gabbia nelle cosidette centrali automatiche, cioè in centrali sfruttanti forze d'acqua non

Digitized by Google

rilevanti senza intervento o con riduzione al minimo di personale; tuttavia questa sua applicazione, ad onta della semplicità d'impianto e di esercizio, ebbe scarso successo, perchè il generatore asincrono, in causa della corrente magnetizzante assorbita, peggiora il fattore di potenza della rete. È bensì vero che è possibile portare all'unità il fattore di potenza con mezzi appropriati (metodo di Heyland, compensatori di fase) ma la loro applicazione complica l'impianto e ne aumenta il costo. Per questa e per altre ragioni si impiegano ormai anche nelle centrali automatiche generatori sincroni, dotati di alta reattanza per limitare l'assorbimento di corrente alla loro inserzione e di avvolgimenti smorzatori per facilitarne la sincronizzazione. Di solito essi vengono portati ad una velocità prossima alla sincrona, connessi alla rete ed eccitati immediatamente dopo, anzi di preferenza sovraeccitati affinchè compensino parzialmente nella rete la corrente reattiva in ritardo. La messa in marcia e la messa fuori servizio si possono iniziare mediante una serie di metodi, per es. mediante un comando a distanza azionato da una centrale non lontana attraverso fili piloti, dopodichè le successive operazioni si compiono secondo schemi abbastanza semplici. Naturalmente occorrono dispositivi di regolazione e di protezione contro le più usuali cause di disturbo, senza però esagerare in tali accessori se si vuole che la centrale automatica rappresenti una reale economia; tuttavia già il costo degli apparecchi più necessari impedisce la conveniente applicazione di un simile tipo di centrale a forze d'acqua di troppo piccola importanza.

5. - *I limiti di potenza raggiunti nell'ultimo sessennio dagli alternatori e dalle centrali.*

L'economia e la semplificazione dell'impianto e dell'esercizio inerenti alla concentrazione della potenza portarono con ritmo assai rapido, specialmente negli ultimi anni, alla creazione di unità sempre più potenti.

Poco prima della guerra mondiale la concentrazione di 5.000 kVA in un turboalternatore bipolare (3000 giri/min. a 50 per./sec.) sembrava cosa degna della più alta ammirazione e quasi il massimo raggiungibile; nel 1921 si era già arrivati per lo stesso tipo a 25.000 kVA. In quello stesso anno i limiti di potenza degli alternatori — diversi a seconda della natura e della velocità della motrice a cui questi venivano accoppiati — erano i seguenti:

Con motori a combustione interna	4000-5000	kVA
» turbine idrauliche	30.000	»
» » a vapore 3000 giri/min.	25.000	»
» » » » 1500 » »	50.000	»
» » » » 1000 » »	60.000	»

Il limite indicato per i generatori della prima categoria era dovuto unicamente alla difficoltà che a quella data presentava la costruzione dei relativi motori primi per maggiore potenza. Tuttavia gli alternatori di questa classe, pur essendo facilmente costruibili, presentavano, per le ragioni indicate parlando della macchina a vapore ed in genere di quelle a stantuffo, un peso piuttosto forte per unità di potenza, circa 35 kg./kVA per i maggiori.

Il peso per kVA diminuisce col crescere della velocità. Esso riesce tuttavia ancora abbastanza notevole per gli alternatori accoppiati a turbine idrauliche e ciò per le cause accennate trattando di queste motrici; a quell'epoca si aggirava ad esempio per grandi alternatori da 12000 e 30000 kVA, 300 giri/min. rispettivamente intorno ai 12 e ai 7 kg.

Nel più potente alternatore fino allora in funzione, quello da 60.000 kVA, 1000 giri/min. installato nella centrale Goldenberg (diametro e lunghezza del rotore 2,25 e 3 m., diametro esterno dello statore 4,80 m., distanza fra le mezzarie dei supporti 6,60 m.), il peso per kVA riuscì di 4,2 kg.

Ormai però i limiti suesposti sono tutti superati più o meno notevolmente a seconda delle varie categorie. Anzi si può dire che attualmente i limiti di potenza sono più che altro determinati di mano in mano dal bisogno che si presenti di unità ancora maggiori delle preesistenti, oltrechè, ben s'intende, dalla possibilità di trasporto delle loro parti.

La potenza delle macchine della prima categoria venne poi più che raddoppiata. Nel 1926 fu messo in funzione nella centrale Neuhof delle officine elettriche di Amburgo un Diesel da 15.000 HP, 94 giri/min. Questo gigante a nove cilindri di 860 mm. di alesaggio e con 1500 mm. di corsa degli stantuffi è lungo 23,4 m., largo 4,3 m. ed alto 11,8 m.: esso è accoppiato a un generatore trifase da 13.000 kVA, 10.000 kW. Così pure negli ultimi anni vennero costruiti motori a gas che a 94 giri/min., 1500 mm. di corsa dello stantuffo forniscono 8.000 kW come macchine gemelle in tandem senza ricupero e 10.000 kW con ricupero del calore dei prodotti della combustione.

Fra i generatori accoppiati a turbine idrauliche il più potente è quello installato nel 1924 dalla Niagara Falls Company (che poi ne installò altri due di ugual potenza), il quale presenta le seguenti caratteristiche: 65.000 kVA, 52.000 kW, cos $\varphi = 0{,}8$; 107 giri/min., 25 per./sec., e che da solo produce circa il 50 % di più degli undici generatori installati 25 anni fa con una potenza unitaria — a quei tempi rilevante — di 3750 kVA. È intessante far menzione dei cambiamenti apportati nella costruzione del nuovo alternatore rispetto ad uno dei vecchi. La tensione di esercizio venne elevata da 2200 a 12.000 V; il tipo bifase a poli esterni e a bassa reattanza fu sostituito col tipo trifase a poli interni e ad alta reattanza; le perdite di energia ammontanti prima a pieno carico a 7-8 % si ridussero a circa il 2 %. Invece della connessione colla turbina mediante un albero di 50 m. di lunghezza, le due macchine sono in immediata vicinanza senza supporto intermedio di guida; le loro giranti, invece di poggiare su un perno di spinta con olio in pressione, sono sostenute dallo statore mediante un perno superiore a segmenti tipo Kingsbury. Il nuovo alternatore pesa in cifra tonda 700 tonn. e quindi 10,8 kg./kVA, mentre il vecchio pesava quasi 23 kg./kVA, cioè più del dop-

Digitized by Google

pio ; se anche il peso attuale per kVA è alto rispetto a quelli che s'incontrano in moderni generatori potenti per 50 per./sec. alle velocità ormai comuni negli impianti idraulici, ciò è dovuto al piccolo numero di giri dell'alternatore in esame, alla sua bassa frequenza, all'alto rendimento che si ebbe di mira nel progettarlo.

L'America porta pure la palma per la potenza raggiunta dalle centrali idroelettriche; alcuni di questi impianti (Niagara, Queenston, Big Creek, ecc.) hanno una potenza di parecchie centinaia di migliaia di kW. Nel Marzo 1926 le forze d'acqua utilizzate negli Stati Uniti per produzione di energia elettrica ammontavano a circa 11,2 milioni di cavalli.

Notevoli progressi si fecero pure nella potenza dei singoli turboalternatori ed ancor più in quella complessiva delle centrali a vapore.

Nella centrale Hudson Avenue della Brooklyn Edison Company venne installato nel 1923 un turbo alternatore esapolare da 62.5000 kVA, 50.000 kW, cos $\varphi = 0{,}8$, 1200 giri/min., 60 per./sec., con un rendimento a pieno carico e cos $\varphi = 1$ (calcolato in base alle perdite) di 97,5 % ed un peso, escluso il basamento e i supporti, di 197 tonn. La suindicata centrale, che fornisce l'energia elettrica alla parte Brooklyn di New York, a sviluppo completo conterrà macchinario per 400.000 kW. La New York Edison Cy. ha in costruzione la centrale di East River in cui in un primo tempo in macchinario installato consterà di due gruppi di 60.000 kW ciascuno ed in un secondo tempo verrà portato a 700.000 kW. Sono pure in costruzione per la Centrale di Hell Gate nella medesima città due alternatori, l'uno da 75.000 e l'altro da 85.000 kW, comandati dai due tamburi di una stessa turbina a vapore da 160.000 kW. Complessivamente le dieci centrali che alimentano New York avranno fra breve una potenza di due milioni e mezzo di kW.

La centrale della Crawford Avenue a Chicago contiene grandi turboalternatori, la potenza delle cui turbine è compresa fra 50.000 kW per le prime installate (1925) e 104.000 kW per l'ultima (in montaggio), arrivando complessivamente a 440.000 kW.

La State Line Generating Co. installerà nella centrale che sta erigendo presso il lago Michigan un aggregato la cui turbina a vapore (42 atm.) avrà la potenza di 208.000 kW.

Ma non soltanto in America si trovano macchine ed impianti ultrapotenti ; anche la vecchia Europa gareggia in questo riguardo col nuovo mondo, specialmente per impianti a vapore.

La centrale Goldenberg a Knapsack (Colonia) appartenente al Rheinisch-Westfälische Elektrizitätswerk possiede quattro turboalternatori esapolari, ciascuno da 60.000 kVA (il primo funzionante dal 1921) oltre a macchinario minore per oltre 100.000 kVA e riversa giornalmente nella rete più di tre milioni di kWh.

Nella centrale di Gennevilliers presso Parigi, in cui si erano già installati tre turboalternatori da 45.000 kVA (il primo nel 1922), si misero in funzione nel 1926 due nuovi alternatori da 60.000 kVA, 50.000 kW, che, marciando a 1500 giri/min., costituivano i più potenti alternatori tetrapolari fino allora costruiti. Questa centrale a sviluppo completo sarà provvista di macchinario per circa 380.000 kVA, 320.000 kW, fornendo quasi la metà dell'energia richiesta dal circondario di Parigi, questa città compresa.

La centrale di Rummelsburg presso Berlino conterrà in un primo impianto già in avanzata costruzione sedici caldaie, ciascuna di 1750 m.^{2} di superficie di riscaldamento, producenti il vapore a 35 atm. e 425°, con preriscaldamento dell'aria e combustione di solo carbone polverizzato sul posto ; tre turbine da 12.500 kVA che servono principalmente a scopi termici (preriscaldamento dell'acqua di alimentazione ecc.) raggiunti mediante il vapore intermedio e di scarico, ma che inoltre coi generatori accoppiati provvedono ai servizi interni e riversano nella rete l'energia elettrica eventualmente ancora disponibile ; tre turbine principali, ciascuna da 80.000 kW di carico massimo e costituita da un tamburo ad alta, uno a media e due a bassa pressione, di cui sia il gruppo dei primi che il gruppo dei secondi comanda un alternatore a 1500 giri/min. da 44.000 kVA direttamente collegato con un trasformatore di pari potenza. In un secondo tempo l'impianto potrà fornire complessivamente 600.000 kVA, 480.000 kW a carico normale, 540.000 kW a sovraccarico.

I più potenti alternatori, come mostrano gli esempi addotti, si sono costruiti esapolari e tetrapolari cioè a 1000 e 1500 giri/min a 50 per/sec. Oggi però vi è la tendenza ad aumentare la velocità a 3000 giri/min. perfino per unità da 32.000–40.000 kVA arrivando all'enorme potenza di 20.000 kVA per polo. Ciò perchè un gruppo turbo da 1500 giri/min. costa, a pari potenza, circa il 25 % di più di uno a 3.000, il quale inoltre presenta rispetto al primo i vantaggi di un minor consumo di vapore nonchè di minori dimensioni e peso con conseguente maggiore facilità di trasporto e di montaggio.

E in Italia ? Se da noi non si è ancora sentito il bisogno di unità ed impianti termici così potenti come i succitati, se noi non possediamo cascate paragonabili a quelle del Niagara, tuttavia la ricchezza di forze d'acqua e la valentia degli ingegneri nello sfruttarle hanno dato luogo a una serie di impianti notevolissimi sia per la geniale sistemazione idraulica che per la potenza singola e complessiva del macchinario. Il serbatoio del Tirso immagazzina mediante una grandiosa diga più di 400 milioni di m^3. Le turbine delle centrali di Fadalto, del Velino, di Venaus sono di potenza intorno ai 24.000 HP ; le ultime, per un salto di 1030 m. e 500 giri/min., sono Pelton ad unica ruota ed unico ugello e costituiscono le più potenti macchine di tal genere finora esistenti. Gli impianti idroelettrici attuati od iniziati a tutto il 1925 avevano complessivamente una potenza di più di due milioni e mezzo di cavalli. Fra gli impianti in costruzione quelli della Sila e dell'Isarco saranno capaci di un'erogazione annua rispettivamente di 200 e 500 milioni di kWh.

Anche in Scandinavia vi sono importantissimi impianti idroelettrici, fra cui basti citare quello che utilizza le cascate di Rjukan (185.000 kW) e fra

Digitized by Google

i più moderni quelli di Trollhättan con tredici turbine da circa 13.000 HP ciascuna e di Porjus che a sviluppo completo sarà di analoga potenza.

6. - *Problemi inerenti alla costruzione dei grandi alternatori.*

I progressi realizzati nella costruzione dei grandi alternatori furono, come si è visto, così imponenti e così rapidi da dare l'illusione che essi siano stati raggiunti con relativa facilità. Invece molte e gravi furono le difficoltà che si dovettero vincere, sia di natura elettrica sia — anzi specialmente — di natura meccanica e tecnologica. Alcuni problemi poi si può dire non abbiano ancora trovato una soluzione definitiva; tali sono quelli — di capitale importanza — dell'isolamento e dello smaltimento del calore nelle grosse macchine. Di alcune delle principali questioni agitatesi faremo qui un rapido cenno.

Sforzi centrifughi. – Nei generatori accoppiati a turbine idrauliche la parte costruttivamente più difficile è l'induttore, soggetto com'è alla duplice esigenza di presentare un alto momento d'inerzia e di resistere alla velocità di fuga della motrice. I poli devono venir fissati in modo da contrastare gli sforzi centrifughi pur senza indebolire soverchiamente la corona della ruota polare. Se attualmente l'incastro a coda di rondine rappresenta una soluzione abbastanza soddisfacente, non è detto che esso lo sarà altrettanto alle velocità maggiori delle attuali, a cui tende la moderna tecnica delle turbine idrauliche.

Per i grandi turboalternatori la costruzione meccanicamente più sicura del rotore cilindrico, ma che presenta notevoli difficoltà tecnologiche, è quella in cui il tamburo pieno del miglior acciaio al nichelcromo è fucinato in un sol pezzo coll'albero. L'avvolgimento di eccitazione ripartita viene tenuto in posto nelle scanalature fresate a coda di rondine mediante biette metalliche ad alta resistenza meccanica; le teste delle bobine si assicurano talvolta mediante cerchiature di filo d'acciaio, più spesso e con maggior successo mediante solide cappe. Finchè queste si costruivano di bronzo non era possibile oltrepassare certe dimensioni radiali e quindi una certa potenza della macchina, circa 6000 kVA se bipolare; ormai si è arrivati invece a 32.000 kVA e più, pure a 3000 giri/min., usando per le cappe uno speciale acciaio legato non magnetico, avente un carico di rottura di 85–90 kg/mm². e un limite di snervamento di 75–80 kg/mm². Un vantaggio accessorio delle cappe è di formare insieme alle biette un avvolgimento smorzatore.

Supporti. - Nella loro costruzione si sono fatti negli ultimi anni notevoli progressi sopratutto dopo che venne riconosciuta praticamente l'importanza della pellicola d'olio fra perno e cuscinetti, la quale all'attrito fra due metalli sostituisce quello fra strato e strato di lubrificante. Nei casi comuni basta la lubrificazione ad anello senza raffreddamento, ma, se la pressione superficiale unitaria è alta ed il numero di giri elevato, si deve adottare il raffreddamento ad acqua dei cuscinettti oppure la lubrificazione ad olio in pressione con circolazione e raffreddamento di questo.

Col problema della lubrificazione dei supporti è in buona parte legata la storia degli alternatori lenti accoppiati a turbine idrauliche. Negli impianti a bassa caduta e grande portata venne dapprima adottata la costruzione verticale, e si ritenne risolto il problema dei supporti mediante un perno di spinta lubrificato con olio in pressione. Senonchè le disastrose conseguenze che in parecchie centrali si verificarono in seguito a mancato funzionamento degli apparecchi ausiliari a cui la lubrificazione era affidata, nonchè altre ragioni, portarono poi a una decisa preferenza dell'alternatore ad albero orizzontale. Ma ciò non durò a lungo, e fra le varie cause che contribuirono alla riabilitazione dei generatori ad ombrello una delle più notevoli fu l'introduzione del perno portante a segmenti con lubrificazione automatica, tipo Kingsbury, che si applica a tali alternatori nel modo seguente. Lo statore per mezzo di bracci a campana porta un piastrone su cui, in nicchie praticate secondo una circonferenza, sono disposte delle sferette su ciascuna della quale può oscillare un segmento; sul complesso di questi segmenti posa un altro piastrone solidale all'albero la cui centratura e verticalità sono assicurate da semplici supporti di guida. In causa della viscosità del lubrificante eccitata dall'alta velocità relativa fra piastrone superiore e segmenti, questi si inclinano automaticamente di quel tanto che è necessario per portare la pressione nel lubrificante ad entità tale da fare equilibrio al carico esterno, mantenendo quindi staccate le superfici metalliche. Il perno Kingsbury per l'alternatore da 65.000 kVA al Niagara sopporta l'enorme peso di 560 tonn.

Questi supporti a segmenti hanno trovato numerose applicazioni anche nelle turbine a vapore per equilibrare l'eventuale spinta assiale residua.

Velocità critica. - Alla velocità critica, quella cioè alla quale per qualsiasi inflessione della linea elastica i valori delle forze centrifughe nelle diverse sezioni sono equilibrate dalle reazioni elastiche dell'albero, il rotore si mette a vibrare, e tali vibrazioni, se la velocità critica non viene rapidamente superata, vanno ampliandosi così da diventare ben presto assai pericolose. L'albero deve quindi venire dimensionato in modo che il suo numero critico di giri sia sufficientemente lontano dal normale, in più o in meno; a 1000-1500 giri è il primo metodo (detto dell'albero rigido) che si usa, a 3000 il secondo (chiamato dall'albero flessibile).

Si dimostra che alla velocità critica presentata da una macchina a fondazioni assolutamente rigide se ne aggiungono altre due se quest'ipotesi non è soddisfatta, ed effettivamente furono di recente osservati casi di forti oscillazioni del rotore di turboalternatori dovute appunto alla causa in discorso.

Oscillazioni torsionali. - Se muta la potenza trasmessa dalla motrice all'alternatore da uno ad altro valore costante, si modifica pure la deformazione

Digitized by Google

angolare di torsione dell'albero, assumendo un nuovo valore di regime dopo alcune oscillazioni transitorie. Ma se la variazione della potenza (p. es. in motrici a stantuffo) o del carico avviene in modo ritmico, essa dà luogo ad impulsi il cui periodo può eventualmente coincidere con quello di oscillazione naturale del sistema costituito dall'inerzia delle masse rotanti e dalle reazioni elastiche conseguenti alla deformazione. In questo caso di risonanza nascono pericolose oscillazioni torsionali di mano in mano esaltantisi che possono dar luogo perfino alla rottura dell'albero ; qualora esse si presentino, vi si rimedia variando in più o in meno il momento d' inerzia della massa rotante oppure rinforzando o indebolendo i due tronchi di albero.

Corti circuiti e sforzi ad essi dovuti. - Ogni corto circuito improvviso s'inizia con un periodo transitorio in cui la corrente assume ampiezze di gran lunga maggiori di quella permanente di corto circuito. In conseguenza le teste delle bobine statoriche, specialmente nei grandi turboalternatori, restano soggette a sforzi spesso così rilevanti che il loro amarraggio costituisce uno dei più importanti problemi per il costruttore. Questi sforzi hanno una triplice origine, venendo esercitati dall'avvolgimento di eccitazione, dal ferro statorico e dalle teste di bobine appartenenti ad altre fasi, e, come ha dimostrato l'esperienza confermando le previsioni dei calcoli, riescono di entità incomparabilmente superiore in alternatori veloci che non in alternatori lenti di pari caratteristiche (potenza, tensione e corrente). Anche se le sollecitazioni non sono sempre in grado di deformare le teste di bobina nel loro complesso, è molto probabile che danneggino almeno i tubi isolanti, cimentati a flessione alla loro uscita dalle scanalature, facilitandone così un successivo perforamento elettrico in quella zona.

Un tipo di amarraggio delle teste è ad es. quello di piegarle ad arco in modo da poterle fissare al ferro mediante due serie concentriche di robusti bulloni, riuniti fra loro mediante ponti metallici da essi isolati elettricamente.

Ma qualsiasi artificio costruttivo sarebbe stato in certi casi insufficiente se negli ultimi anni non si fossero costruiti gli alternatori con maggiore dispersione magnetica di prima, riducendo così i rapporti della corrente subitanea e della corrente permanente di corto circuito alla normale. Per aumentare la dispersione esistono due mezzi. Si può da una parte costruire la macchina a flusso induttore debole o, ciò che torna lo stesso, a forte reazione d' indotto, ma d'altra parte si può, pur progettando l'alternatore con flusso forte, aumentare artificialmente le fughe magnetiche nelle scanalature. Giusta il secondo metodo furono costruiti i grandi alternatori da 45.000 e da 60.000 kVA di Gennevilliers, le cui scanalature sono riempite dai conduttori solo per una metà della loro altezza ; vantaggio accessorio di questa disposizione è la formazione di un canale per l'aria di raffreddamento.

Per macchine già esistenti, nonchè per macchine nuove quando ragioni economiche lo consiglino, si può limitare la corrente di corto circuito anche mediante opportune bobine di autoinduzione senza ferro, o reattori. È preferibile inserire queste bobine non fra i singoli generatori e le sbarre, sibbene nelle condutture che da esse si dipartono, se queste, come spesso avviene, sono in numero maggiore dei generatori, perchè — a pari induttività e quindi a pari azione protettiva — resta così ridotta la caduta di tensione in esercizio, data la minor corrente che scorre nelle derivazioni.

All'alta reattanza dei generatori va unita una loro notevole caduta normale di tensione, ma ciò non si deve riguardare come inconveniente importante per macchine fornite di un buon regolatore rapido, p. es. di un Tirrill. Questo però, tendendo a mantenere costante la tensione dell'alternatore anche nel caso di un corto circuito, ne rinforza l'eccitazione ed in conseguenza aumenta la corrente d'armatura che allora si suscita. Perciò recentemente si dota tale regolatore di un relais di sovracorrente che lo disinserisce quando si sviluppa il corto circuito, oppure produce la diseccitazione della macchina ; talvolta, con un provvedimento ancora più radicale, si aggiunge un regolatore automatico di corrente che allora, oltre a disinserire quello di tensione, assume la regolazione della corrente ad un predeterminato valore costante. È chiaro che questi dispositivi non possono agire così prontamente da influire sul valore della corrente subitanea di corto circuito ; essi però, riducendo quella successiva permanente, alleggeriscono il compito degli interruttori automatici, che devono venir regolati in modo da scattare quando il periodo transitorio del corto circuito è ultimato o pressochè.

Il corto circuito può avvenire anche nell'avvolgimento stesso dell'alternatore. Per ovviare alle conseguenze di tale eventualità si può adoperare la protezione differenziale Merz - Price, confrontando in ogni fase le correnti al morsetto ed al punto neutro ; quando esse riescono diverse un relais differenziale diseccita la macchina e fa scattare l'automatico, oltre a porre eventualmente in azione altri dispositivi atti a soffocare un incendio. Un moderno metodo di protezione consiste nell'uso di un sistema di uguali bobine di autoinduzione inserite a stella parallelamente al generatore, che qui si suppone pure concatenato a stella ; verificandosi nell'avvolgimento di questo un corto circuito fra spire, il punto neutro elettrico non coincide più col baricentro del triangolo delle tensioni concatenate, sicchè fra i punti neutri del generatore e della bobina trifase nasce una tensione. Questa origina una corrente nella bobina ampermetrica di un relais wattmetrico provvisto di due bobine voltmetriche che (attraverso trasformatorini di tensione) sono sottoposte a due delle tre tensioni concatenate ; in tal modo il relais funziona qualunque sia la fase in cui è avvenuto il corto circuito, ed invece resta insensibile alla corrente di magnetizzazione della bobina trifase che eventualmente scorre nel filo neutro, perchè questa è prevalentemente di frequenza tripla della fondamentale, mentre la terza armonica non appare nelle tensioni concatenate e pertanto il relais non è soggetto per questa causa ad alcun momento di rotazione.

Digitized by Google

Perdite addizionali nel rame dell'indotto. - L'avvolgimento d'armatura percorso da corrente suscita in ogni scanalatura un campo trasversale alternativo, la cui intensità in una sezione parallela alla base dell'alveolo dipende dalla corrente che circola nella parte di conduttore compresa fra l'una e l'altra. Se vi è una sola sbarra per canale, le correnti parassite che pertanto in essa si suscitano provocano una ripartizione disuniforme della corrente principale, che va addensandosi dall'orlo interno all'orlo esterno del conduttore. Questa disuniformità equivale per lo sviluppo di calore ad un aumento di resistenza.

Il fenomeno presenta caratteri ed effetti quantitativi piuttosto differenti se la scanalatura, invece di un unico conduttore massiccio, ne contiene parecchi. Così ad es. in scanalature contenenti 1 o 2 o 3 conduttori uguali — in ogni caso con un'altezza totale di 6 cm. — l'energia dissipata in calore a 50 per./sec. riesce nel complesso 5,4 o 8,4 o 8,2 volte maggiore della corrispondente per corrente continua. Ancora più rilevante è il rapporto considerato per il conduttore superiore; esso nel terzo caso arriva a 16,4. Però, aumentando il numero dei conduttori a pari altezza complessiva, il quoziente fra la perdita a corrente alternata e quella a corrente continua diminuisce rapidamente.

Per evitare o almeno diminuire a limiti praticamente tollerabili tali perdite addizionali (il cui calcolo esatto si sa effettuare solo da pochi anni) conviene però non soltanto usare parecchi conduttori elementari, ma altresì uniformare le f.e.m. in essi indotte dal campo trasversale cambiando la loro posizione relativa entro scanalature successive o in parti contigue della stessa scanalatura.

Spesso ci si accontenta di ripiegare le connessioni frontali dei singoli conduttori in modo che l'elemento superiore in un lato di bobina diventi l'inferiore nell'altro. In soluzioni più perfette i conduttori elementari vengono in una stessa scanalatura ripiegati e ritorti in guisa da venire successivamente ad occupare tutti i punti della sezione.

Isolamento. - Alle alte tensioni in uso per i grandi alternatori (da 6.000 a 15.000 V ed anche più) il problema dell'isolamento dell'avvolgimento è stato risolto mediante il cosidetto compoundaggio delle bobine. Questo procedimento ha per iscopo di evitare che fra i singoli conduttori di una bobina rimangano delle occlusioni d'aria, perchè in esse, in causa della minor costante dielettrica e quindi della maggior sollecitazione rispetto agli altri isolanti, si manifestano degli effluvi elettrici che danno luogo alla formazione di ozono e di ossido d'azoto, e questi alla loro volta insieme all'umidità dell'aria si combinano in acido nitrico che danneggia rapidamente gli isolanti.

Per tale ragione le bobine, già avvolte su sagoma, vengono essiccate nel vuoto, asportandone così ogni traccia di umidità e di aria, poscia impregnate sotto pressione conveniente mediante una miscela omogenea detta compound perchè composta di asfalto e di una sostanza diluente (vaselina, cera, paraffina o simili), e da ultimo — dopo averle strettamente avvolte sui fianchi con micarta o micanite — compresse alle dimensioni delle scanalature. Le bobine preparate secondo questo od analoghi metodi, che nel raffreddamento acquistano una notevole rigidezza meccanica, vengono introdotte nelle scanalature aperte dei generatori verso cui esse risultano già isolate senz'altro.

Fino a 10.000-12.000 Volt gli avvolgimenti così ottenuti non danno luogo — nemmeno alla tensione di prova — ad effluvi nei sottili strati d'aria ancora esistenti. Essi però possono manifestarsi in macchine a tensioni superiori, anzi sono pressochè inevitabili specialmente in alternatori monofasi con un polo a terra (per trazione) nell'interstizio fra la guaina isolante di un lato di bobina e le pareti della scanalatura in cui questo riposa. A tale inconveniente si rimedia spalmando di una vernice conduttrice o metallizzando la superficie esterna dell'isolante, dimodochè lo strato d'aria resta per così dire shuntato. Inoltre per simili macchine è facile la formazione di effluvi in vicinanza degli angoli delle scanalature, essendo il campo elettrico in questa zona distribuito in modo sfavorevole. Un artificio che la evita è quello di avvolgere strettamente attorno a ogni lato di bobina — in prossimità della sua uscita dall'alveolo — un foglio di stagnola sul quale si dispone un manicotto di lamierino d'ottone o di rame; questa connessione metallica porta la superficie esterna della bobina — al suo passaggio dal ferro statorico nell'aria — al potenziale del primo, cioè a quello della terra, sicchè la tendenza a scariche fra la bobina e la terra viene concentrata all'orlo esterno — opportunamente foggiato a cercine — del manicotto, dove può essere facilmente combattuta mediante un isolamento sufficiente.

Certo è che purtroppo nel campo degli isolanti non si sono fatti progressi di analoga importanza a quelli raggiunti per i materiali metallici. L'ideale sarebbe di trovare mediante sintesi una sostanza che riunisse in sè eccellenti proprietà isolanti con una serie di altre proprietà preziose nelle applicazioni alle macchine elettriche, quali l'omogeneità, la facile lavorazione, l'incombustibilità, una conduttibilità termica e una dilatazione analoghe a quelle del rame.

Riscaldamento e smaltimento del calore. - Il fatto che gli attuali isolanti elettrici sono anche cattivi conduttori del calore costituisce una grave difficoltà specialmente nella costruzione di alternatori ad alta tensione e di grande potenza, pei quali la prima richiede un notevole spessore di isolante con corrispondente salto di temperatura e la seconda rilevanti dimensioni assiali che conducono ad un maggior riscaldamento nella parte mediana.

Le sorgenti di calore in una macchina sono tante e di così diversa natura che è pressochè impossibile predeterminare col calcolo l'esatta distribuzione della temperatura nelle sue varie parti. Anzi il salto di temperatura può cambiare perfino di senso a seconda dell'entità del carico, perchè le perdite nel ferro ne sono quasi indipendenti mentre quelle nel rame ne seguono le variazioni con legge quadratica. A

Digitized by Google

pieno carico, il calore che si sviluppa nelle bobine si propaga dalla loro mezzaria nella direzione dei conduttori verso le connessioni frontali; se queste però non sono soggette ad una energica ventilazione, la loro temperatura può riuscire più elevata che non nella parte mediana della bobina, e pertanto il calore che in questa si sviluppa non trova allora altro sfogo che nel ferro attraverso il tubo isolante, sicchè per ridurre il conseguente maggior riscaldamento della bobina si deve limitare al minimo possibile l'isolamento delle connessioni frontali.

La propagazione del calore nel ferro attivo avviene essenzialmente nella direzione della laminazione, essendo ostacolata in senso normale dalla carta isolante e dal velo d'aria fra lamiera e lamiera; tuttavia le intercapedini radiali hanno grande importanza nei moderni turboalternatori di notevole lunghezza, perchè costituiscono brevi condotti di rilevante sezione per l'aria di raffreddamento. Anzi, avvenendo il disperdimento di calore alla superficie esterna dei singoli pacchi di lamiere, vi è attualmente la tendenza ad aumentare il numero di questi in potenti turboalternatori, riducendone la larghezza a cinque o sei centimetri.

Dal suesposto risulta chiaro come nell'interno delle macchine, specialmente se potenti e molto sviluppate in senso assiale, possano regnare temperature ben diverse da quelle rilevate da misure termometriche nei punti accessibili o da misure di aumenti di resistenza negli avvolgimenti. Costituisce quindi un notevole progresso il controllo metodico della temperatura in varii punti della macchina mediante i cosidetti rivelatori interni, formati da coppie termoelettriche o da termometri a resistenza (bobinette di cui si misura la variazione di resistenza elettrica) previamente allogati durante la costruzione della macchina; però nemmeno il loro impiego permette di determinare con precisione la distribuzione della temperatura e il suo valore massimo. Ed invero nella disposizione a due conduttori per alveolo, un rivelatore posto fra i due tubi isolanti indica con sufficiente esattezza soltanto la temperatura media fra conduttore superiore ed inferiore, di cui però il primo è più caldo in causa delle maggiori perdite addizionali; nella disposizione ad unico conduttore per scanalatura un rivelatore collocato fra il tubo isolante ed il ferro misura una temperatura sensibilmente al disotto di quella del rame in causa del salto di temperatura nel tubo isolante, salto che cresce collo spessore del tubo e quindi colla tensione della macchina. Rivelatori in diretto contatto col rame ne misurerebbero la temperatura con maggior esattezza, ma la loro applicazione, oltre a riuscire più complicata per ragioni di sicurezza, porta ad una lesione dell' isolante.

Lo smaltimento del calore si può agevolare sia aumentando la superficie irradiante (p. es. nel ferro, come si è già visto, adottando pacchi di lamiere di piccola larghezza, nel rame delle bobine eccitatrici suddividendo queste in sezioni distanziate), sia — anzi sopratutto — intensificando la ventilazione. Una macchina può venir ventilata dalla sua parte rotante — sola o, come di solito, coll'aiuto di alette di ventilazione ad essa fissate — oppure mediante appositi ventilatori.

La ventilazione è affidata alla sola parte rotante in alternatori aperti di piccola potenza accoppiati direttamente a motrici termiche a stantuffo, perchè, presentando il loro induttore a basso numero di giri grande diametro e molti poli, essi possiedono già una girante atta a funzionare anche come ventilatore e sono inoltre dotati di una sufficiente superficie di irradiamento.

Non così avviene alle maggiori velocità angolari solitamente usate nelle turbine idrauliche e per maggiori potenze. Conviene allora ricorrere alla costruzione semichiusa o protetta, nella quale l'aria viene aspirata dall'ambiente mediante alette costituenti due ventilatori frontali addossati al sistema rotante. Essa, dopo avere attraversato i canali di ventilazione nel ferro attivo e lambito le teste di bobina, si raccoglie in camere collettrici disposte verso la periferia dello statore, da dove viene espulsa o nella sala macchine o, meglio, mediante speciale condotto all'aperto.

Se le singole unità sono di potenza rilevante o se la quantità d'aria richiesta dal loro complesso in una centrale non può venir aspirata dalla sala macchine senza superare una velocità sopportabile per il personale, è necessario prevedere per l'aria fresca appositi canali di comunicazione con l'esterno; l'aria calda viene espulsa come nel caso precedente. Il movimento dell'aria nei canali e nella macchina, che allora deve essere completamente chiusa, viene provocato da ventilatori addossati oppure da ventilatori separati. Questi ultimi offrono vari vantaggi rispetto ai primi; ed invero essi possono venire costruiti con criterii più razionali e lasciano mano libera nella regolazione della ventilazione resa indipendente dal tipo costruttivo e dalla velocità dell'alternatore; inoltre il miglior rendimento che questo allora presenta porta ad un risparmio annuo superiore alla spesa di esercizio del ventilatore, l'aria arriva alla macchina a temperatura più bassa, la distanza fra i supporti viene ridotta ciò che rende la marcia più silenziosa.

Per i generatori ad ombrello l'aria fresca entra assialmente al disotto, poi, riscaldatasi attraversando la macchina, sbocca in un collettore circolare previsto nelle fondazioni attorno alla carcassa e da lì, seguendo un condotto di uscita, passa all'esterno; oppure sia all'adduzione che all'espulsione dell'aria servono appositi canali praticati nelle fondazioni.

Il problema di più difficile soluzione è costituito dalla ventilazione dei grandi turboalternatori, per la quale sono necessarie ingentissime quantità di aria; per darne un'idea concreta basti dire che un simile generatore da 30.000 kW con un rendimento del 96 % richiede circa 38 m.^{3}/sec. d'aria, se questa nel passaggio attraverso alla macchina si riscalda di 30°, e quindi in un'ora 150 tonn. cioè più del peso del generatore stesso.

Finchè la potenza non eccede certi limiti basta o la ventilazione radiale o l'assiale; nella prima — in tali casi di solito preferita — l'aria scorre attraverso le strette intercapedini lasciate fra i pacchi

Digitized by Google

di lamiera, nella seconda essa viene spinta da un ventilatore, p. es. da quello di destra, attraverso canali assiali praticati nello statore, e spesso anche nel rotore, ed aspirata dal ventilatore di sinistra. Tuttavia a questo modo la macchina si riscalda di più dalla parte dell'uscita dell'aria, sicchè col crescere della potenza si deve ricorrere alla combinazione delle due forme di ventilazione, facendo entrare assialmente l'aria da ambo le parti ed uscire radialmente attraverso un largo canale centrale o parecchi più stretti; è questa la soluzione che — con diverse varianti — è oggidì la più usata.

Per rendere più attiva la ventilazione ed in genere il raffreddamento vennero proposti, e talvolta adottati con successo, vari artifici, fra cui i seguenti. Un metodo razionale, ma affetto da difficoltà costruttive, consiste nell'uso di conduttori cavi per l'avvolgimento statorico; esso è specialmente indicato nel caso di una o due sbarre per scanalatura, dove la riduzione della sezione del conduttore in località opportune può riuscire senz'altro di importanza secondaria in vista della disuniforme ripartizione della corrente, di cui si è già parlato in occasione delle perdite addizionali nel rame; gli usuali canali assiali nel ferro dello statore diventano allora in generale superflui, e quelli radiali per l'espulsione dell'aria si possono limitare ad una fessura centrale comunicante con ciascun conduttore cavo. Nell'avvolgimento a bobine con molti fili per scanalatura questi possono invece venir disposti attorno a un tubo di ventilazione. Da tale idea non è grande il passo a quella contenuta in altri brevetti, e dapprima applicata a generatori ad alta frequenza con rilevanti perdite nel ferro, del raffreddamento a circolazione d'acqua nei suaccennati conduttori cavi o tubi, o meglio — per evitare il pericolo dell'umidità — a circolazione d'olio, che si può far scorrere in canali assiali nel ferro, nonchè in altri che un opportuno profilo degli alveoli lascia fra le pareti di questi e i conduttori; l'olio caldo viene sospinto nella parte più alta della macchina, dove trova un fascio di tubi di raffreddamento o da dove viene condotto in un refrigerante esterno.

Altre recenti proposte per intensificare il raffreddamento si basano sull'evaporazione di un liquido o sulla circolazione di un gas diverso dall'aria. Così, secondo moderne ricerche sperimentali e teoriche, l'uso dell'idrogeno come mezzo di raffreddamento presenterebbe i seguenti vantaggi: per una stessa sopraelevazione di temperatura la potenza di una data macchina può venir aumentata di almeno il 30 %, contemporaneamente il rendimento cresce al minimo dell'1 %, il pericolo d'incendio resta escluso, i dannosi effetti degli effluvi elettrici riescono assai attenuati non formandosi ozono ed ossidi d'azoto, il refrigerante del gas in circolazione risulta più piccolo e più a buon mercato che coll'uso dell'aria (del raffreddamento a circolazione di uno stesso quantitativo d'aria si parlerà fra breve). Ma, ad onta dei suaccennati pregi, la circolazione dell'idrogeno urta contro l'ostacolo non ancora superato di impedire che il gas sfugga parzialmente dalla macchina, la cui perfetta ermeticità è assai difficilmente raggiungibile.

Se gli speciali sistemi suaccennati si riferiscono in generale al raffreddamento dello statore, ne vennero però proposti altri più o meno analoghi anche per i rotori cilindrici. In questi però già il raffreddamento ad aria può venire facilmente reso più energico dando ad ogni scanalatura un profilo a gradino, tale cioè che al disotto dei relativi conduttori rimanga in essa un canale per l'aria, e — quando ciò non basti — ricavando altri canali dai fianchi dell'alveolo mediante opportune rientranze. Fu anche proposto di praticare nei denti dei condotti assiali a diametro decrescente verso la base, ovviando alla diminuzione di sezione che così risulta mediante due diversi passi alle scanalature e facendo alternare un dente forato con un dente pieno. Ancora più radicale è l'idea di adibire metà degli alveoli alla sola ventilazione.

Data l'enorme quantità d'aria circolante nei grandi turboalternatori, anche le più piccole tracce di polvere e di altre impurità in essa contenute possono in tempo relativamente breve formare un sensibile deposito sulla superficie dei condotti di ventilazione, diminuendone la sezione ed ostacolando la dispersione del calore. Abbandonati da tempo i filtri di stoffa o a superficie asciutta, che facilmente si ostruivano e davano luogo al pericolo di incendio, vennero poi in uso i filtri a superficie umida fissa o mobile e (specialmente in America) quelli a lavaggio. Attualmente però la soluzione a cui sembra riservato il maggior successo è la ventilazione in circuito chiuso, nella quale è sempre lo stesso quantitativo d'aria pura che circola attraverso la macchina e che viene raffreddato mediante batterie di tubi in cui scorre acqua. È strano che ad un metodo così semplice si sia incominciato a pensare solo nel 1920; in breve tempo però le sue applicazioni presero uno sviluppo veramente straordinario.

In tale procedimento è opportuno adoperare come acqua di raffreddamento quella di condensazione della turbina a vapore (la cui temperatura può venir diminuita d'estate — se necessario — mediante uno speciale refrigerante ad acqua fresca), perchè così si raggiunge un duplice vantaggio: la purezza dell'acqua di condensazione evita incrostazioni sulla superficie interna dei tubi ed il calore da dissiparsi viene utilizzato per il riscaldamento di quell'acqua che serve all'alimentazione delle caldaie. Un'altra buona proprietà della ventilazione in ciclo chiuso consiste in ciò, che di estate, adoperando nei tubi acqua sufficientemente fredda, si può abbassare la temperatura dell'aria circolante di parecchio al di sotto di quella dell'aria esterna; invece d'inverno è quest'ultima che ha temperatura minore, però l'uso di aria troppo fredda potrebbe riuscire dannoso per la conseguente condensazione di umidità. Infine il metodo in discorso facilita la protezione dei generatori contro gli incendi, come ora vedremo accennando alle misure che si prendono a questo riguardo.

Protezione contro gli incendi. - I danni dell'incendio di un generatore, sia nei riguardi del costo della riparazione, sia in quelli della diminuzione dell'energia prodotta dalla centrale, sono tanto più sen-

Digitized by Google

sibili quanto maggiore è la sua potenza. Epperò specialmente per i grandi turboalternatori, che inoltre richiedono enormi quantità d'aria di ventilazione facilitanti il propagarsi della combustione e delle fiamme, è necessaria l'adozione di misure preventive che rendano difficile l'iniziarsi di un incendio, e di mezzi atti a procurarne il rapido spegnimento quando esso si sia già manifestato. La soluzione radicale, che forse ci porterà l'avvenire, consisterebbe nella sostituzione degli attuali isolanti (cotone, carta, vernici ecc.) con altri che godessero anche della proprietà preziosa di essere incombustibili.

Fra i metodi di prevenzione si annoverano l'ottimo isolamento ed in genere la buona costruzione degli avvolgimenti, la purezza dell'aria di ventilazione e tutti gli accorgimenti e i dispositivi — di cui si è fatto cenno in un precedente paragrafo — per limitare la corrente di corto circuito nonchè i relativi sforzi meccanici, diseccitare la macchina e provocare lo scatto dell'automatico.

A incendio iniziato, deve inoltre cessare subito l'adduzione dell'aria; tuttavia è difficile ottenere una chiusura ermetica dei condotti. Per il suo spegnimento si sono usati l'acqua o il vapore, che, mediante ugelli diramantesi da un tubo anulare, si iniettano in gran quantità verso le teste di bobina, costituenti la parte maggiormente posta a repentaglio. Ma questi metodi agiscono lentamente e, se l'avvolgimento bagnato può poi venire asciugato mediante l'effetto termico della corrente, l'azione prolungata del vapore fortemente surriscaldato può invece danneggiare gli isolanti.

Allo stesso scopo si adottano pure dei gas opportuni, ed il loro impiego andó acquistando maggior favore dopochè venne in voga la ventilazione in circuito chiuso; mediante l'introduzione di un gas inerte e non dannoso per l'isolamento nella limitata massa d'aria circolante il tenore in ossigeno di questa può venire ridotto fino a rendere impossibile la combustione. I gas da prendere in considerazione sono sopratutto l'acido carbonico e l'azoto, ed in proposito recentissime esperienze hanno portato ai seguenti risultati principali:

La combustione delle sostanze isolanti cessa quando il tenore in ossigeno dell'aria (21 %) venga abbassato nel miscuglio al 14 %. La sostanza che meglio si presta allo spegnimento di un incendio è l'acido carbonico che può venire iniettato allo stato liquido, dando luogo così in brevissimo tempo a grandi quantità di gas, che riempiono in pochi secondi il generatore ed inoltre lo raffreddano in seguito alla sottrazione del calore richiesto dalla trasformazione di stato. Rispetto all'azoto l'acido carbonico presenta i vantaggi di una più rapida espansione nella macchina, di potersi conservare nella quantità voluta in un minor numero di bombole e del più basso prezzo.

7. - *Trasformatori.*

Se in realtà la trattazione della generazione industriale della corrente elettrica di cui ci siamo occupati fin qui esaurisce il compito di questa monografia, il fatto che assai spesso la corrente alternativa viene nelle stesse officine di produzione trasformata a tensione superiore induce a parlare anche degli apparecchi a ciò destinati, se non coll'ampiezza che essi meriterebbero ma che non è concessa dalla tirannia dello spazio, almeno sfiorando alcuni degli argomenti più moderni e di maggior rilievo.

In ciò, analogamente a quanto si è fatto per gli alternatori, ci riferiremo specialmente ai trasformatori di grande potenza; per dare subito l'idea dei limiti per essa raggiunti può bastare la seguente citazione. Nella già menzionata centrale Goldenberg vennero installati nel 1918 due trasformatori da 60.000 kVA, 6250/110.000 V, con avvolgimenti in alluminio (peso 116 tonn., altezza compresi i morsetti m. 5,25; base m. 5,5 × 2,54); alla fine del 1925 si volle aumentare la potenza di uno di essi sostituendo avvolgimenti in rame a quelli in alluminio ed in tal modo si ottenne un trasformatore da 75.000 kVA, a quella data — e forse ancora oggidì — il più potente dell'antico e del nuovo mondo.

I grandi trasformatori sempre, e di regola anche i medi, sono a bagno d'olio, il quale funziona in essi come isolante elettrico e come conduttore termico, ed inoltre, potendo assorbire notevoli quantità di calore, li rende meno sensibili ai sovraccarichi che non quelli a secco. I trasformatori molto potenti vengono oggidì costruiti quasi esclusivamente con lamiere di ferro legato al silicio, perchè, essendo di solito installati in impianti a servizio continuo, conviene presentino piccole perdite nel ferro, mantenendosi queste quasi costanti a tutti i carichi. Pure con basse perdite nel ferro si costruiscono i trasformatori per servizio luce, che lavorano con carico molto ridotto durante la maggior parte del tempo e che quindi è bene offrano il loro rendimento massimo ad un carico inferiore al normale, mentre nei trasformatori per forza motrice che, quando sono in esercizio si trovano per lo più sottoposti al pieno carico o pressochè, conviene che il massimo rendimento — che si verifica quando le perdite nel rame uguagliano quelle nel ferro — abbia luogo circa a carico normale. In conclusione si deve in ogni caso aver di mira sopratutto il cosidetto rendimento annuo del trasformatore.

Attualmente vi è la tendenza a preferire — finchè possibile — al raffreddamento artificiale quello naturale, che dà luogo ad un esercizio più semplice ed è specialmente opportuno per i trasformatori installati all'aperto; esso viene notevolmente intensificato munendo il cassone (che per potenze non rilevanti si fa liscio oppure di lamiera ondulata o a nervature) di radiatori a grande superficie, costituiti da numerosi tubi o serbatoi smontabili in lamiera ondulata comunicanti in alto ed in basso con quello. Il raffreddamento artificiale si distingue in interno e in esterno a seconda che viene ottenuto mediante acqua scorrente in un serpentino — munito spesso di alette — posto nella parte superiore del cassone dove l'olio è più caldo, oppure mediante un refrigerante esterno formato di solito da una spirale tubolare immersa in acqua fresca e raccordata al cassone. Nel primo caso l'olio si muove spontaneamente

Digitized by Google

per la differenza di peso specifico dovuta alla diversa temperatura delle sue parti, e precisamente dall'alto al basso nell'interno del trasformatore (ferro attivo ed avvolgimenti) ed in senso contrario lungo le pareti della cassa costituenti la superficie di raffreddamento; nel secondo caso invece esso viene posto in circolazione da una pompa che lo aspira caldo dalla parte superiore e lo reimmette raffreddato nella parte inferiore del cassone. È a quest'ultimo metodo che si tende a dare la preferenza per i maggiori trasformatori. Sensibili difficoltà offre la dissipazione del calore nel ferro delle grandi unità dove la carta interposta fra le lamiere più centrali può facilmente carbonizzarsi; perciò spesso si prevedono nei loro gioghi e nuclei, ed in specie nel giogo superiore a temperatura più elevata, dei canali diretti normalmente alle lamiere, in cui si fa circolare olio freddo. Per gli avvolgimenti si aumenta la superficie a contatto coll'olio suddividendoli in sezioni distanziate; in quanto al calore che le perdite addizionali sviluppano in essi se formati da conduttori troppo larghi, lo si riduce sostituendo a questi parecchi conduttori elementari in parallelo.

L'olio per trasformatori, oltre ad essere dotato di un'alta rigidità dielettrica, deve non presentare proprietà tali da renderlo inadatto all'uso a cui è destinato, quali soprattutto la tendenza a formare depositi, l'eccessiva viscosità, l'acidità e quant' altro può compromettere i materiali che esso lambisce. Un accessorio del cassone, il cosidetto serbatoio di espansione o conservatore dell'olio, nel mentre permette la dilatazione di questo, impedisce che durante l'esercizio penetri in esso dell'umidità e ne riduce al minimo l'ossidazione, perchè soltanto la superficie del piccolo quantitativo contenuto nel conservatore può venire in contatto con l'aria, la quale inoltre è resa secca mediante un corpo igroscopico p. es. cloruro di calcio. Naturalmente prima della sua messa in funzione il trasformatore deve venir liberato da ogni traccia di umidità, il che si raggiunge nel modo migliore mediante il suo riscaldamento nel vuoto.

Alle tensioni molto alte, che di solito vanno unite alle grandi potenze, acquista notevole importanza la costruzione appropriata dei morsetti passanti attraverso il coperchio della cassa. La difficoltà consiste non tanto nel costruire un isolatore che resista ad un'alta tensione fra la sua parete interna e l'esterna — problema che, potendosi assimilare il passante in prossimità del coperchio ad un condensatore cilindrico, è risolubile in base ai noti principi che si applicano anche ai cavi — quanto nel fatto che tra il foro praticato nel coperchio e l'isolatore rimane sempre uno straterello d'aria, il quale risulta soggetto ad una sollecitazione tanto più notevole quanto maggiore è la costante dielettrica dell'isolatore impiegato; se questo è di porcellana ($\varepsilon = 5$), tale sollecitazione, a meno di adottare per il foro un diametro assai grande, riesce alle alte tensioni facilmente superiore alla rigidità dielettrica dell'aria, sicchè in questa si formano effluvi e scariche a fiocchi che, riscaldando l'isolatore, ne facilitano il successivo perforamento. L'impiego di passanti pieni in porcellana è quindi escluso anche a prescindere dalle difficoltà tecnologiche della costruzione di simili lunghi isolatori a parete molto grossa; il problema si risolve invece brillantemente con diametri praticamente accettabili, usando tubi a parete sottile — di porcellana o di altri ottimi isolanti pure meccanicamente resistenti — soltanto come sostegno per altre sostanze (olio od opportune miscele) affette da piccola costante dielettrica, in modo che la ripartizione della tensione totale fra i vari isolanti riesca più favorevole per lo strato esterno d'aria, portandone la sollecitazione al disotto della sua rigidità. Si rinunzia del tutto alla porcellana nel morsetto a condensatore, formato di vari tubi di carta impregnata ($\varepsilon = 2$ circa) separati da cilindri metallici; in questa costruzione si riesce ad uniformare la sollecitazione (che in un usuale condensatore cilindrico decresce dall'interno all'esterno) dando ai singoli tubi lunghezze gradualmente diverse.

In un corto circuito subitaneo la corrente può arrivare inizialmente ad un valore doppio, o quasi, della corrente permanente di corto circuito, ed in corrispondenza alla sua forte intensità si producono, oltre ad effetti termici, pericolosi sforzi meccanici. Questi sono di duplice natura, ed invero le spire parallele dell'avvolgimento primario e secondario — percorse da correnti di senso opposto — si respingono, mentre quelle costituenti ciascuno dei due si attraggono tra loro. La prima forza, che tende a sfondare il trasformatore — supposto qui ad avvolgimenti cilindrici coassiali — allargando l'esterno e schiacciando l'interno, può venir sopportata solo da bobine circolari sulle quali essa si ripartisce uniformemente, mentre bobine ellittiche o rettangolari si deformerebbero facilmente. In generale di minore entità è la seconda forza, che agisce in senso assiale e che — cercando di raccorciare l'avvolgimento — è pericolosa specialmente per le bobine estreme; essa può venire conbattuta mediante svariati dispositivi di amarraggio. Con riferimento alle linee del campo di dispersione entrambi i fenomeni si riassumono nella tendenza che esse presentano a respingersi mutuamente ed a raccorciarsi.

Correnti istantanee ancora più intense che nel corto circuito subitaneo possono nascere all'inserzione del trasformatore, che qui supporremo a secondario aperto. Ammettendo che esso venga inserito nel momento più pericoloso in cui la tensione applicata passa per lo zero, alla tensione istantanea di mano in mano crescente deve fare equilibrio soprattutto la f. e. m. di autoinduzione, prodotta dalla variazione del flusso, e in misura di gran lunga minore la caduta ohmica di tensione dell'avvolgimento primario. Se la resistenza di questo fosse nulla, l'induzione nel ferro arriverebbe dopo mezzo periodo nientemeno che alla somma algebrica del doppio del valore massimo dell'induzione in esercizio normale e dell'induzione residua che il trasformatore presentava, sicchè la corrispondente corrente magnetizzante dovrebbe assumere valori enormi, dato che si suole far lavorare il ferro legato dei trasformatori a 10.000-15.000 linee/cm^2. La resistenza ohmica dell'avvolgimento attenua, ma in misura insufficiente, l'entità del fenomeno, sicchè per ovviare alle sue pericolose

Digitized by Google

conseguenze conviene ricorrere per i grandi trasformatori all'inserzione transitoria di una resistenza in serie molto maggiore di quella del primario.

Oltre alle sovracorrenti offrono al costruttore notevoli difficoltà le sovratensioni. Questo problema è così vasto che qui è giocoforza accontentarci di menzionare solo le principali regole pratiche a cui la sua trattazione conduce. È noto come la semplice manovra d' inserzione dia luogo a sovratensioni. Nell' istante in cui la fronte dell'onda di inserzione giunge al punto neutro, il potenziale varia con legge approssimativamente lineare lungo l'avvolgimento, al cui principio assume un valore che nella peggior ipotesi può arrivare al doppio del normale, mentre si annulla alla fine di esso cioè al punto neutro; in quel momento regna quindi fra spira e spira una tensione uguale a due volte quella che fra esse si verifica poi in esercizio. Ma, poichè dopo l'istante considerato avvengono a partire dal punto neutro fenomeni di sovrapposizione delle onde ivi concorrenti con segno contrario, la variazione del potenziale lungo l'avvolgimento — che aveva prima andamento rettilineo — viene ora rappresentata da una spezzata a due segmenti, di cui quello prossimo al punto neutro — e di lunghezza di mano in mano crescente — è più ripido dell'altro e precisamente di tanto che la sollecitazione si raddoppia di nuovo. Ne consegue che l' isolamento del filo sarebbe da commisurarsi ovunque al quadruplo della tensione normalmente esistente fra spire vicine non solo nello stesso strato ma ben anche in strati contigui. Però, avuto riguardo ai fenomeni che accompagnano la penetrazione dell'onda nell'avvolgimento, le prime spire devono venire isolate fra loro per una tensione che, a seconda del rapporto della capacità fra spire contigue a quella di una spira verso terra, può arrivare perfino all'intera tensione di esercizio ; ciò è consigliato anche dal fatto che il principio dell'avvolgimento ne costituisce la parte più esposta alle sovratensioni provenienti per altre cause dalla linea. Pure rinforzato — e prudentemente come per le prime — deve essere l'isolamento delle ultime spire, perchè onde di sovratensione di origine esterna si possono incontrare nel punto neutro con ugual segno in tutte le fasi, dando luogo a fenomeni di riflessione che praticamente rendono la fine dell'avvolgimento quasi altrettanto esposta a pericolo quanto il suo principio.

Alla protezione interna del trasformatore, costituita dal suo appropriato isolamento, deve però aggiungersi una protezione esterna, cioè formata da opportuni apparecchi, contro sovratensioni aventi cause diverse dalla manovra di inserzione ; tali sono, ad esempio, quelle prodotte dalla rapida interruzione di correnti intense, quali si verificano nei corti circuiti, o dalle onde migranti originate dalla variazione di cariche statiche nella linea. L'interruttore ad olio, per la proprietà che gode di interrompere la corrente in un istante in cui essa passa per lo zero, deve quindi essere l'inseparabile compagno del trasformatore ; se esso poi viene scelto ad intercalazione transitoria di resistenza, gradua l'applicazione della tensione di esercizio e diminuisce quindi la sovratensione all'inserzione. Così pure non dovrebbe mai mancare una bobina di protezione, la quale però può appiattire sensibilmente la fronte d'onda con corrispondente riduzione della tensione fra spire solo se dotata di un rilevante coefficiente di autoinduzione.

Di importanza non minore, anzi forse maggiore, del problema dell'isolamento interno è quello di evitare scariche disruptive fra l'avvolgimento ad alta tensione da una parte e quello a bassa tensione ed il ferro dall'altra, però senza spreco di materiale isolante nè di distanze fra l'avvolgimento stesso e i corpi circostanti. Il problema è in istretta relazione colla configurazione del campo elettrico che si stabilisce fra essi. È chiaro ad es. che il ferro attivo, presentando superfici piane e spigoli vivi, dà luogo a ben diverse sollecitazioni nei punti ad esso prossimi del campo elettrico, ma questo può venire uniformato circondando ogni nucleo con un cilindro di lamiera metallica (naturalmente non chiuso, ma a bordi sovrapposti ed isolati) in connessione elettrica col primo. Del resto già la disposizione coassiale degli avvolgimenti con quello ad alta all'esterno procura sufficienti distanze dal ferro, salvochè dai gioghi nella cui prossimità bisogna sacrificare spazio. Con opportuni artifici (p. es. con anelli di adatto profilo disposti alle estremità dell'avvolgimento ad alta tensione) si può pure agire sulla configurazione del campo elettrico fra i due avvolgimenti.

Moderni tipi speciali di trasformatori sono quelli in alluminio, per montaggio all' aperto, con prese di corrente, a tre avvolgimenti.

I trasformatori con avvolgimenti in alluminio, introdotti già prima dell'ultima guerra, vennero adoperati durante essa per la scarsità del rame. I fili di alluminio — data la sua minore conduttività — richiedono sezioni maggiori di quelli di rame e quindi anche un più notevole quantitativo di materiale isolante, come pure di ferro, a parità di numero di spire. D'altra parte la superficie di raffreddamento risulta maggiore ed il peso specifico dell'alluminio è circa un terzo di quello del rame ; difficoltà per la sua saldatura ormai non esistono più. Non si può prevedere se gli avvolgimenti in alluminio verranno usati ancora, se mai per i trasformatori a secco pei quali la maggior superficie permette di caricarli maggiormente ; si tratta di una questione economica che non si può decidere in un' epoca in cui i prezzi sono in continua e forte variazione.

I trasformatori per installazione all'aperto hanno lo scopo di risparmiare nelle spese del fabbricato. Il loro coperchio deve essere a perfetta tenuta e costruito in modo da facilitare il defluire dell'acqua ; i morsetti passanti — esposti alla polvere, all'umidità ed alle intemperie — devono essere profilati in modo adeguato a simili sfavorevoli condizioni.

I trasformatori con prese di corrente in punti opportuni di uno degli avvolgimenti riserbano la possibilità di variare il rapporto di trasformazione (di solito in misura non superiore a 5 %) p. es. quando non sia ancor stato fissato con tutta precisione il valore della tensione di esercizio o il punto

Digitized by Google

della rete in cui il trasformatore deve venire installato. Dapprima si apportavano le prese in vicinanza del principio dell'avvolgimento, poscia invece di preferenza in prossimità del punto neutro dove il potenziale è basso. Nei potenti trasformatori è consigliabile evitare entrambi questi metodi che, causando dissimmetrie nel campo di dispersione, aumentano lo sforzo assiale nei corti circuiti; la soluzione migliore in tal caso è quella di portare le spire da cui si diramano le prese nella parte mediana del nucleo.

Nei recenti trasformatori a tre avvolgimenti il terzo di questi serve spesso all'alimentazione di un motore sincrono a tensione relativamente bassa, destinato alla regolazione della tensione in una cabina od in altro punto opportuno della rete. Un simile trasformatore può anche venire impiegato per connettere tre reti distinte, ed infine per migliorare la forma della curva della tensione, soffocando la terza armonica mediante la connessione a triangolo del terziario, quando per la messa a terra del neutro od altre ragioni i due avvolgimenti principali siano entrambi connessi a stella.

La costruzione dei trasformatori è ormai così perfezionata che si possono affrontare le più alte tensioni; in America ed anche in Europa ne esistono già a 220.000 V.; in Italia ve ne sono parecchi fino a circa 160.000 V. Tensioni di gran lunga maggiori si raggiungono poi nei trasformatori usati nei laboratori delle grandi ditte per prove ad alta tensione; l'isolamento è ottenuto allora con artifici speciali, fra cui si cita qui il seguente a titolo di esempio. In un trasformatore in olio da 1.000 kVA, 5.000/1.000.000 V. (diametro del cassone 4 m., altezza senza morsetto 4,60 m.) l'avvolgimento primario è in prossimità del ferro attivo e l'avvolgimento secondario (lunghezza del filo 112 km.) assomiglia per forma ad un passante a condensatore, e cioè esso si compone su ciascuna colonna del nucleo di bobine cilindriche coassiali, separate da cilindri isolanti e connesse elettricamente in serie, la cui altezza diminuisce col crescere del diametro; il principio di una delle sue bobine interne è posto a terra, sicchè occorre un solo morsetto passante riunito colla fine dell'avvolgimento. La peculiarità a cui è dovuto il successo della costruzione del secondario consiste nel fatto che le bobine elementari a potenziale di mano in mano crescente si trovano a delle distanze sempre maggiori dalle masse metalliche connesse colla terra. Il morsetto è costruito in carta, secondo il principio già accennato del condensatore, per resistere transitoriamente a due milioni di Volt, cioè al doppio della tensione normale, e presenta le seguenti dimensioni principali: diametro interno 152 mm. (tubo in acciaio), diametro esterno massimo 920 mm., altezza 5,8 m., peso 6 tonn.

Digitized by Google

Digitized by Google

PROF. RICCARDO ARNÒ

R. SCUOLA D'INGEGNERIA DI MILANO

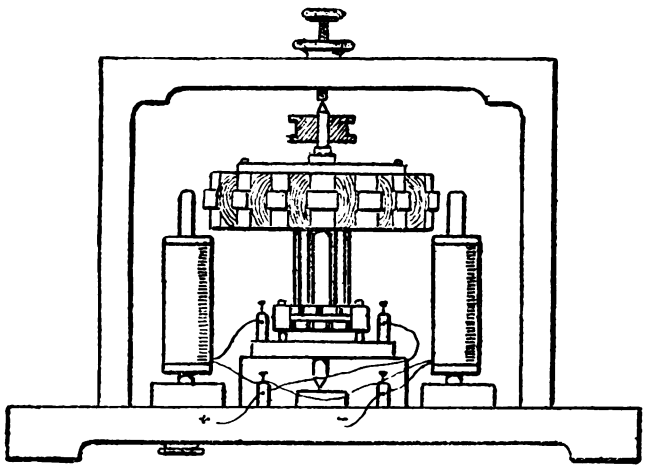
MOTORI ELETTRICI

Digitized by Google

LA " MACCHINETTA ELETTROMAGNETICA "

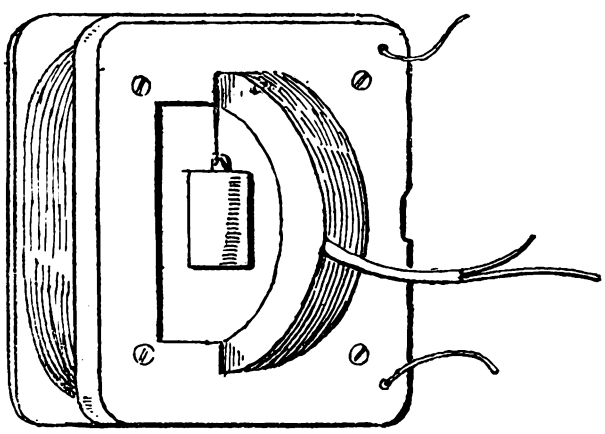
DEL PACINOTTI

(*Riproduzione della Tav. che accompagna la monografia originale di A. Pacinotti, anno* 1862)



IL " CIMELIO " DEL " CAMPO FERRARIS "

(*Riproduzione del primo apparecchio costruito da Galileo Ferraris, anno* 1885)



Digitized by Google

COPPIA CHE SI ESERCITA SOPRA UN ELETTROMAGNETE SITUATO IN UN CAMPO MAGNETICO.

Osserviamo che un motore elettrico od una macchina dinamo-elettrica si può sempre ridurre col pensiero ad una forma molto semplice e la più schematica.

Una spirale di armatura percorsa da corrente ed equivalente ad un magnete di momento magnetico A, di direzione e grandezza $O\,A$, è situata in un campo magnetico di cui $O\,B$ rappresenta la direzione ed il valore della induzione magnetica B: i due vettori A e B facendo in un dato istante alla fine di un certo tempo t che noi prendiamo a considerare, un determinato angolo α. Il detto campo magnetico esercita allora sul magnete una coppia il cui momento di rotazione K è dato da:

$$K = A\,B \operatorname{sen} \alpha.$$

Se si tratta di un motore la coppia è motrice e tende a chiudere l'angolo α nel verso u, e fa un lavoro. Se invece si tratta di una macchina dinamo-elettrica, la coppia è resistente e si deve spendere un lavoro per ottenere l'effetto contrario di aprire l'angolo α nel verso opposto u'.

Nel caso precedentemente studiato dei motori a corrente continua tanto A quanto B sono vettori costanti tanto in grandezza, quanto in direzione.

Ma se noi ora eliminiamo queste restrizioni e supponiamo che l'uno o l'altro o tutti e due i vettori B ed A possano variare periodicamente col tempo, in grandezza od in direzione, oppure tanto in grandezza quanto in direzione, noi possiamo col medesimo semplicissimo schema rappresentare anche tutti i motori a corrente alternativa.

Noi possiamo quindi intanto fare una prima classificazione di tutti i motori elettrici esistenti in pratica suddividendoli a seconda della natura del vettore B: e cioè prendendo a considerare le tre seguenti categorie di motori:

1° *Motori a campo magnetico costante*, per i quali l'induzione magnetica B è costante in grandezza e direzione;

2° *Motori a campo magnetico rotante*, per i quali B è costante in grandezza, ma non in direzione: B è un *vettore rotante*;

3° *Motori a campo magnetico alternativo*, per i quali B è costante in direzione, ma non in grandezza: B è un *vettore alternativo*.

E per ciascuna di queste tre classi di motori si potranno considerare tanti casi quante sono le ipotesi sulla natura dell'altro vettore, e cioè del momento magnetico A.

Prima però di passare in rassegna i vari casi di motori elettrici secondo la classificazione di cui si è detto, conviene vedere in generale come praticamente si possa ottenere che:

1° Il momento magnetico A del magnete equivalente alla spirale di armatura sia un vettore costante in direzione, mentre è rotante il supporto materiale del magnete ideale stesso;

2° L' induzione magnetica B del campo magnetico induttore sia un vettore rotante, mentre sono fisse le spirali percorse dalle correnti eccitatrici.

Le soluzioni di questi due problemi costituiscono le due scoperte più importanti dell'Elettrotecnica per quanto riguarda i motori elettrici, essendo che — salvo i motori a corrente alternata sincroni, che non sono altro che alternatori adoperati in senso inverso, ed i motori a ripulsione, di pochissime applicazioni — tutti i motori esistenti nella pratica industriale si basano sopra queste due grandi invenzioni.

E qui i cortesi Lettori permetteranno che l'Autore sospenda per pochi istanti il rigido dire di questa modesta esposizione elementare dei principii dei motori elettrici, per dare un giusto sfogo al suo cuore di italiano, riunendo insieme i due grandi nomi di Antonio Pacinotti e di Galileo Ferraris.

Il primo risolse la prima questione fin dall'anno 1862 con la costruzione del primo motore a corrente continua, mentre nello stesso titolo *Motore ad elettromagnete trasversale* della classica Memoria pubblicata nel *Nuovo Cimento*, egli annunzia la completa soluzione del problema.

Il secondo risolse la seconda questione con la geniale scoperta del *Campo magnetico rotante* o *Campo Ferraris* di cui parleremo nelle trattazioni che seguono, e della cui priorità l'Autore ha avuto l'onore di dire in seno all'Assemblea della Associazione Elettrotecnica Italiana in occasione della celebrazione del XXV° anniversario della Morte del grande scienziato.

Digitized by Google

Ed ora possiamo passare a studiare tutti i vari tipi di motori a corrente continua, a corrente alternata ed a correnti polifasi.

E noi ciò faremo svolgendo per ciascuno dei singoli tipi di motori una semplice teoria elementare con lo scopo di renderci conto delle principali proprietà di essi, e del loro modo di funzionamento nei vari casi della pratica industriale, tralasciando di considerare tutti i fenomeni secondari che avvengono nel rispettivo funzionamento delle diverse specie di motori: e così pure omettendo la descrizione di qualsiasi particolare di calcolo e di costruzione delle macchine che stiamo per prendere in esame.

Noi applicheremo la teoria dei vettori rotanti ed alternativi di Galileo Ferraris (1), che per uno studio semplice e sintetico, destinato agli ingegneri, è quello che maggiormente si presta per conoscere le proprietà fondamentali dei motori elettrici: e che d'altronde per la sua genialità non potrebbe per nessuna ragione venire sostituito con altro metodo analitico in una esposizione come questa che, mentre vuole essere affatto elementare, deve mantenere carattere di assoluta generalità.

MOTORI ELETTRICI
A CAMPO MAGNETICO COSTANTE.

Motori a corrente continua; (B costante; A costante).

Incominciando ora a considerare i motori a campo magnetico costante, supponiamo dapprima che il vettore A sia costante tanto in grandezza quanto in direzione: ciò che si ottiene mandando nella spirale di armatura chiusa di Pacinotti una corrente continua.

Essendo B ed A costanti tanto in grandezza quanto in direzione, anche il momento della coppia di rotazione del motore $K = A\,B$ sen α è costante: e si ha così l'ordinario motore a corrente continua, nel quale la spirale di armatura percorsa dalla corrente corrisponde ad un magnete coi suoi poli nelle rispettive posizioni delle spazzole, vale a dire ad un magnete costantemente trasversale al campo magnetico induttore.

Indipendentemente dalle precedenti considerazioni, presa a considerare una ordinaria macchina dinamo-elettrica a corrente continua, noi possiamo subito dire che essa può costituire anche un motore a corrente continua: basta perciò ricordare la legge di Lenz. Se nell'armatura di un'ordinaria macchina a induzione noi mandiamo una corrente continua, l'armatura della macchina stessa è sollecitata da una coppia che tende a metterla in rotazione.

La prima macchina dinamo-elettrica costruita dal Pacinotti, con lo scopo di applicare il suo principio, era appunto destinata a funzionare come motore elettrico.

È chiaro intanto che per la legge di Lenz il verso di rotazione dell'apparecchio funzionante come motore è opposto a quello in cui si deve fare girare l'armatura della macchina per produrre, col medesimo campo magnetico induttore — nel caso della eccitazione indipendente e dell'eccitazione in serie — la corrente indotta avente il medesimo verso di quella per mezzo della quale l'apparecchio funziona come motore. Nel caso invece della macchina con eccitazione in derivazione — invertendosi allora anche il campo magnetico — si avrà l'effetto opposto.

È chiaro poi che nel caso delle macchine autoeccitatrici, siano esse in serie od in derivazione, invertendo il senso della corrente che si invia nel motore, si inverte anche la direzione del campo magnetico induttore: per cui non si inverte il verso della rotazione.

Una conseguenza importante di questo fatto è che, come effettivamente avviene nella pratica, le macchine eccitate in serie possono — qualora esse siano opportunamente costrutte — anche funzionare come motori elettrici a corrente alternativa. Per le macchine eccitate in derivazione invece, quantunque teoricamente ciò dovrebbe anche accadere, queste non risultano praticamente adatte in causa del grande spostamento di fase che si avrebbe fra i due flussi magnetici rispettivamente dovuti alla corrente induttrice ed alla corrente indotta.

Ciò premesso, proponiamoci di calcolare il lavoro elettrico utile che si spende nell'unità di tempo nell'apparecchio per farlo funzionare come motore. Dicendo e la forza contro-elettromotrice che si genera nella spirale di armatura ed i_1 l'intensità della corrente nell'armatura stessa, si ha:

$$W = e\,i_1.$$

E poichè:

$$e = 10^{-8}.\ n\ N\ \varphi,$$

dove n è la frequenza di rotazione (numero di giri al 1" moltiplicato per il numero delle coppie di poli), N il numero dei tratti utili della spirale di armatura e φ il flusso di induzione magnetica attraverso l'interferro della macchina.

Si può quindi ancora scrivere:

$$W = 10^{-8}.\ n\ N\ \varphi\ i_1.$$

Dicendo ora K il momento della coppia di rotazione, si ha anche:

$$W = 2\,\pi\,n\,K.$$

Onde:

$$K = \frac{10^{-8}}{2\,\pi}.\ N\ \varphi\ i_1.$$

Dalla quale relazione, che serve a calcolare il valore di K, risulta che esso è indipendente da n.

Infine, se diciamo R la resistenza interna della macchina, per calcolare la differenza di potenziale ai poli basterà applicare la legge di Ohm alla spirale indotta:

$$V = e + R\,i_1.$$

(1) GALILEO FERRARIS: *Un metodo per la trattazione dei vettori rotanti od alternativi, ed una applicazione di esso ai motori elettrici a corrente alternata.* — R. Accademia delle Scienze di Torino, 3 dicembre 1893.

Digitized by Google

Con queste semplici relazioni noi possiamo ora intraprendere lo studio delle proprietà dei motori elettrici a seconda del loro modo di inserzione in serie o in derivazione, e considerando per ciascuno di questi due casi rispettivamente i vari modi di eccitazione in serie e in derivazione.

Incominciamo dalla inserzione in serie, e supponiamo dapprima che i singoli motori siano eccitati in serie.

La condizione fondamentale da essere soddisfatta per il fatto che i motori sono inseriti in serie in un medesimo circuito è quella che sia mantenuta costante l'intensità della corrente nel circuito stesso. Ma se i motori sono eccitati in serie, evidentemente risulta anche costante il flusso magnetico induttore: in conseguenza rimane costante il momento della coppia di rotazione del motore. In questo caso dunque ogni singolo motore non può funzionare praticamente senza il sussidio di uno speciale apparecchio regolatore ausiliario, comandato a sua volta da un regolatore a forza centrifuga.

Per queste ragioni i sistemi in serie non hanno ricevuto che poche applicazioni, fra le quali per l'importanza storica deve essere citata quella dell'impianto di motori inseriti in serie ed eccitati in serie nella trasmissione e distribuzione elettrica dell'energia da Isoverde a Genova.

Tale impianto eseguito dall'Ing. Thury della « Compagnie de l'Industrie Electrique » di Ginevra, e che ha funzionato con buoni risultati, è stato ora sostituito con altro impianto a corrente alternativa: e ciò, oltre che per le complicazioni di cui abbiamo detto dovute alle necessità di applicare dei complicati regolatori ai singoli motori, anche, e forse essenzialmente, per il fatto che i sistemi in serie non sono pratici essendo necessariamente sistemi ad alta tensione e quindi presentanti grandi difficoltà di isolamento specialmente in riguardo al funzionamento dei motori di piccola potenza.

Per quanto poi riguarda il caso dei motori inseriti in serie ed eccitati in derivazione, è facile vedere che si avrebbero tutti gli inconvenienti relativi ai motori in serie, ma con l'aggiunta della difficoltà dell'avviamento del motore, che non si potrebbe effettuare che ricorrendo a speciali artifizi che ne renderebbero ancora più complicato e difficile il funzionamento nella pratica industriale.

Ma passiamo ora al caso importante dei motori elettrici inseriti in parallelo, ed osserviamo subito che in tal caso la condizione fondamentale da soddisfarsi è quella di mantenere ai poli del motore, e quindi nella stazione centrale, una differenza di potenziale V praticamente costante.

Incominciamo a supporre che i motori siano eccitati in derivazione. Allora evidentemente anche il flusso di induzione magnetica φ risulta costante, per cui è soltanto variabile l'intensità della corrente i_1 nella spirale indotta, potendo infatti allora scrivere:

$$K = \frac{10^{-8}}{2\pi} . N \varphi i_1 = \text{costante} \times i_1 .$$

E precisamente, essendo la legge di variazione di i_1 data dalla relazione che si scrive applicando la legge di Ohm alla spirale indotta:

$$V = e + r_1 i_1 ,$$

ove r_1 è la resistenza ohmica della spirale stessa: e cioè:

$$i_1 = \frac{V}{r_1} - \frac{e}{r_1} ,$$

risulta che K è uguale ad una costante meno un termine proporzionale ad e, e più precisamente:

$$K = \frac{10^{-8}}{2\pi} . N \varphi \frac{V}{r_1} - \frac{10^{-8}}{2\pi r_1} . N \varphi e .$$

Ma ora osserviamo che e è proporzionale ad n, almeno fra certi limiti per cui è trascurabile la reazione d'indotto della macchina:

$$e = 10^{-8} . n N \varphi .$$

Onde si potrà finalmente dire che K è uguale ad una costante meno un termine proporzionale ad n; e precisamente scrivere:

$$K = \frac{10^{-8}}{2\pi} . N \varphi \frac{V}{r_1} - \frac{1}{2\pi r_1} (10^{-8} . N \varphi)^2 . n ;$$

onde si ricava:

$$n = 10^8 \frac{V}{N \varphi} - 2\pi r_1 \left(\frac{10^8}{N \varphi}\right)^2 . K .$$

La quale equazione che serve a calcolare i singoli valori di n in corrispondenza dei vari valori di K, ci dice chiaramente quale è il modo di funzionare del motore. Detta equazione infatti è l'equazione di una retta avente per ascisse n e per ordinate K, discendente verso l'asse delle ascisse; e questa è quindi la caratteristica del motore (fig. 1).

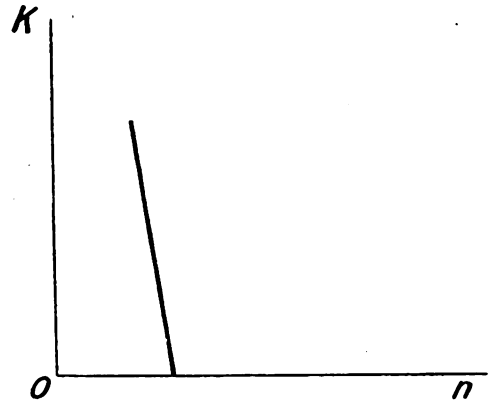


Fig. 1.

Il funzionamento del motore è dunque stabile, ed esso sarà tanto più appropriato ad essere utilizzato in pratica quanto più le variazioni di n sono piccole a fronte delle corrispondenti variazioni di K.

Il motore deve essere dunque calcolato e costrutto in modo che la resistenza ohmica della spirale in-

Digitized by Google

dotta sia molto piccola, ciò che equivale ad ottenere che la sua caratteristica sia una retta rapidamente discendente verso l'asse delle ascisse.

Da quanto è stato detto risulta dunque che i motori inseriti in parallelo ed eccitati in derivazione sono i più adatti in una ordinaria distribuzione dell'energia elettrica: ed essi precisamente sono quelli, e soltanto quelli, che nel caso ordinario della pratica hanno ricevute importanti applicazioni.

Ed è facile ancora vedere come le piccole variazioni di velocità corrispondenti alle variazioni del carico, si possano facilmente correggere mediante un reostato inserito in serie nella spirale di eccitazione della macchina, col quale si possa fare variare il flusso di induzione magnetica.

Infatti dalla sovrascritta relazione, si deduce che — per il caso di r piccolissimo — si può approssimativamente scrivere:

$$n \approx 10^8 \frac{V}{N \varphi}.$$

Onde si vede che per fare aumentare n basta diminuire φ: il che corrisponde a crescere, per mezzo del reostato regolatore, la resistenza del detto reostato.

Supponiamo ora infine che l'eccitazione dei motori inseriti in parallelo sia in serie. Allora essendo:

$$i_2 = i_1 = i$$

ne risulta che i_2 segue le stesse variazioni di i_1 col variare di n; e cioè:

$$i_2 = i_1 = \frac{V}{r_1 + r_2} - \frac{e}{r_1 + r_2}.$$

Ma d'altra parte alle variazioni di i_2 corrispondono variazioni di φ date rispettivamente dalle ordinate della caratteristica del circuito magnetico. Onde ricordando che:

$$K = \frac{10^{-8}}{2\pi} . N \varphi i_1,$$

ne risulta chiaro l'andamento della caratteristica del motore (fig. 2):

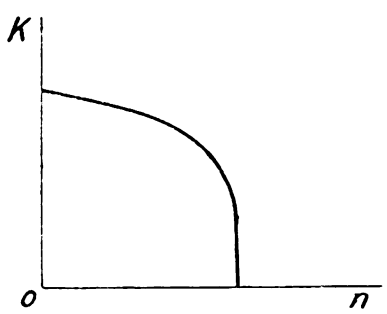


Fig. 2.

E cioè per $n = o$ si avrà il massimo valore del momento della coppia di rotazione K (notevolmente più grande di quello che si avrebbe se il motore fosse eccitato in derivazione); poi la linea discende abbastanza lentamente verso l'asse delle ascisse in corrispondenza della saturazione del materiale magnetico; poscia presenta un ginocchio per valori di n corrispondenti ai valori delle ascisse del ginocchio della caratteristica magnetica; ed infine la linea discende abbastanza rapidamente verso l'asse delle ascisse, per valori di n relativamente grandi.

I motori inseriti in derivazione ed eccitati in serie godono quindi della proprietà che in corrispondenza delle variazioni di K, si hanno notevoli variazioni di n. E perciò, e per il fatto che K è grandissimo per $n = o$, detti motori si presentano come i più convenienti nel caso speciale ed importantissimo dei motori destinati alla trazione elettrica.

Riprendendo ora lo studio in generale dei motori a campo magnetico costante, è facile vedere che per i casi di A rotante (costante solo in grandezza) e di A alternativo (costante solo in direzione) non si possono costituire dei motori, essendo per tali casi il valore medio di K uguale a zero.

MOTORI A CORRENTE ALTERNATIVA SINCRONI INDUTTORE FISSO, INDOTTO MOBILE.

(B costante, A rotante ed alternativo)

Passiamo quindi a considerare la classe dei motori a campo magnetico costante (B costante) per i quali il vettore A è rotante ed alternativo. Sono questi, come vedremo, i motori sincroni a corrente alternata, rappresentati da ordinari alternatori adoperati in senso inverso, con induttore fisso e indotto mobile.

Diciamo n la frequenza con cui varia il valore di A ed m la frequenza della rotazione, cioè il numero di giri al 1" moltiplicato per il numero delle coppie di poli.

Considerando dapprima fisso il vettore alternativo A, esso allora equivale a due vettori rotanti, l'uno d nel verso destro e l'altro s nel verso sinistro, ambedue con la frequenza n (fig. 3).

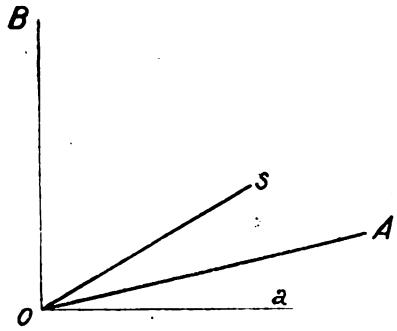


Fig. 3.

In queste condizioni noi possiamo quindi sostituire al magnete di momento magnetico A, due magneti rotanti rispettivamente di momento magnetico d ed s.

Evidentemente la coppia motrice è uguale alla somma delle due coppie i cui momenti sono dati dai rispettivi prodotti:

$$d\ B \text{ sen } v,$$
$$s\ B \text{ sen } \sigma.$$

Digitized by Google

Ma essendo il valore medio di questi uguale a zero, sarà ancora uguale a zero il valore medio del momento K della coppia di rotazione dell'apparecchio, che conseguentemente non può quindi funzionare come motore. Se ora immaginiamo che l'armatura ruoti, per esempio, nel verso destro, con la frequenza $m < n$: allora si avrà che la frequenza dei due vettori componenti d ed s è rispettivamente uguale ad $n + m$ ed a $n - m$; ma anche in tali condizioni il valore medio di K risulta ancora uguale a zero, e non si può avere un motore.

Finalmente supponiamo che la frequenza m di rotazione sia uguale ad n.

Si avrà allora che — tralasciando di considerare il vettore d rotante alla frequenza $2n$, per il quale rimane tuttora nullo il momento della coppia che B esercita su d — il vettore s, rappresentato in figura in OS, ruota con la frequenza zero, e quindi rimane fisso nello spazio, facendo un certo angolo σ con OB.

Il momento della coppia che B esercita su s:

$$K = s\,B \operatorname{sen} \sigma,$$

che, essendo $s = \frac{A}{2}$, si può anche esprimere:

$$K = \frac{A\,B}{2} \operatorname{sen} \sigma,$$

ha dunque un valore costante: per cui allora, e solo in queste condizioni, si può avere un motore.

Possiamo dunque avere un motore a corrente alternativa eccitando l'elettromagnete induttore con una corrente continua, e facendo ruotare in questo campo magnetico costante una spirale di armatura aperta percorsa da una corrente alternativa. L'apparecchio, che non è altro che l'ordinario alternatore adoperato in senso inverso, funziona però come motore soltanto alla condizione che la sua velocità di rotazione sia uguale alla frequenza della corrente alternativa percorrente la spirale di armatura.

In tali condizioni l'angolo σ che i vettori OB e OS fanno tra di loro rimane costante finchè è costante il carico del motore. Se diciamo R il momento della coppia resistente, l'equilibrio dinamico sussiste finchè $R = K$.

Ma supponiamo ora che R cresca fra certi determinati limiti: per cui come primo effetto si abbia una piccola diminuzione della velocità del motore, e cioè un aumento dell'angolo σ inferiore a 90°. Allora il momento della coppia di rotazione $K = \frac{A\,B}{2} \operatorname{sen} \sigma$ aumenta anch'esso in corrispondenza dell'aumentato valore di σ, per cui l'equilibrio dinamico continua a sussistere.

Quanto detto però vale inquantochè, come abbiamo già osservato, l'angolo σ rimanga inferiore a 90°: perchè altrimenti con l'aumentare di σ, diminuisce sen σ, e quindi diminuisce il valore del momento della coppia motrice in corrispondenza dell'aumentato valore del momento della coppia resistente, nelle quali condizioni l'equilibrio dinamico cessa di essere possibile: onde in pochi istanti il motore si arresta.

E così si dica se, invece di supporre che aumenti il valore di R, si considera il caso in cui R diminuisce: onde al limite, quando il momento della coppia resistente non sia più che quello che si compete per vincere le resistenze passive, anche l'angolo σ corrispondentemente assume un valore minimo.

In queste condizioni quindi anche il momento della coppia motrice è minimo, ciò che corrisponde al funzionamento a vuoto del motore.

Il motore che noi abbiamo ora considerato, oltre che presentare il grave inconveniente di non avviarsi da sè, non può funzionare che ad una sola velocità, e cioè alla velocità di sincronismo: esso perciò si dice nella pratica *motore sincrono*. E questo fatto che costituisce una proprietà del motore in quanto esso debba servire come macchina ricettrice in una trasmissione di energia elettrica, rappresenta invece un inconveniente gravissimo nelle ordinarie distribuzioni elettriche, ove si richiedono invece dei motori asincroni funzionanti nelle stesse condizioni dei motori a corrente continua inseriti in derivazione ed eccitati in derivazione, che precedentemente noi abbiamo studiato.

MOTORE SINCRONO SOVRAECCITATO

INFLUENZA DELL'ECCITAZIONE.

I motori sincroni presentano i gravi inconvenienti di possedere una velocità invariabile, di non essere atti a sopportare facilmente bruschi sovraccarichi, e di dovere per essi provvedere al loro avviamento con speciali artifizi.

Se tali motori sono preziosi allorquando si tratta di una semplice trasmissione elettrica dell'energia da una stazione generatrice ad una ricevitrice, essi non si adattano per essere applicati nelle ordinarie distribuzioni elettriche. Se però in queste essi sono tuttora abbastanza largamente impiegati, ciò è dovuto ad una loro qualità preziosa, la quale risiede nel fatto che non solo la corrente di alimentazione può essere condotta in fase con la differenza di potenziale alla quale il motore è destinato di funzionare, ma si può anche riuscire di portare la corrente in precedenza di fase rispetto alla differenza di potenziale medesima.

L'interpretazione del fenomeno può essere facilmente resa come segue:

Nell'istante della messa in parallelo della macchina sincrona, la tensione V che si ha ai morsetti della macchina è uguale e contraria alla forza elettromotrice E generata nell'indotto della macchina. La forza elettromotrice risultante è zero, e la macchina non è percorsa da corrente.

Se la macchina viene frenata (funzionamento da motore) la E ritarda sulla V, e la tensione risultante che ne nasce ha un valore ρI, in cui I è il valore efficace della corrente circolante e ρ l'impedenza della spirale indotta della macchina.

Nelle macchine moderne la resistenza ohmica interna r è trascurabile rispetto alla resistenza induttiva $\lambda = 2\pi n L$, ove L è l'induttanza della spirale indotta: e quindi ρ si può eguagliare a λ.

Digitized by Google

Ne risulta che la tensione $\rho I \approx \lambda I$ è praticamente in anticipo di fase di 90° rispetto alla corrente I che la genera.

Si può produrre un campo magnetico di intensità praticamente costante e di direzione rotante per mezzo di apparecchi fissi, per mezzo di correnti

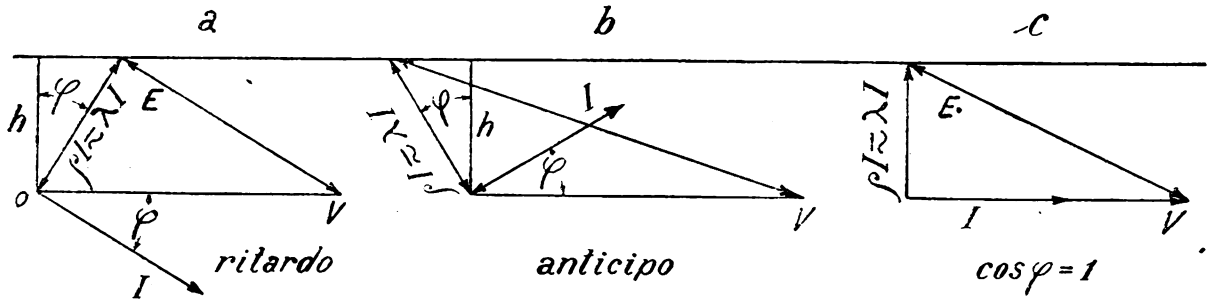


Fig. 4.

Dalla figura 4 si vede che la corrente I che percorre la macchina ha direzione contraria alla f. e. m. E, perchè si è nel caso del motore, mentre essa ha la stessa direzione della tensione applicata V. Vediamo ora come variano la E e la I quando varia l'eccitazione, rimanendo costante la potenza assorbita $W = VI \cos\varphi$. Chiamando h la distanza dell'estremo di E dalla retta in cui giace V, si osserva che $h = \lambda I \cos\varphi$; e quindi sostituendo nella formula della potenza, questa risulta espressa da $W = V \frac{h}{\lambda}$

Se W rimane costante, dovrà quindi anche rimanere costante h, essendo V e λ costanti. Risulta quindi che variando la eccitazione del motore a carico costante l'estremo di E percorre una parallela posta alla distanza h da V.

Risulta dunque chiaro che diminuendo l'eccitazione, e quindi la forza elettromotrice, la I ritarda rispetto alla V; aumentando l'eccitazione, la I anticipa rispetto alla V; ed infine per il caso intermedio corrispondente ad $h = \lambda I$, la I risulta in fase con la V.

Il contrario avverrebbe se la macchina funzionasse da generatrice.

Nelle condizioni di sovraeccitazione il motore sincrono si comporta dunque come un condensatore. Onde ne risulta che se in una rete di distribuzione ove sono inseriti motori asincroni, si inserisce in derivazione sull'estremità della linea un motore sincrono, il quale funzioni a vuoto e sovraeccitato, si potrà ricondurre in fase, almeno nella linea e nelle generatrici, la corrente con la forza elettromotrice, perchè si potranno regolare le cose in modo che il ritardo inerente ai motori asincroni sia bilanciato dall'avanzo prodotto dal motore sincrono.

MOTORI ELETTRICI A CAMPO MAGNETICO ROTANTE.

(*Motori a campo Ferraris*).

Il problema della trasmissione e distribuzione elettrica dell'energia con motori asincroni, anche più semplici dei motori a corrente continua, si risolve in modo perfetto ricorrendo ai motori a campo Ferraris, oggi hanno assunta una capitale importanza nelle grandiose e svariate applicazioni dei sistemi a correnti alternate polifasi.

circolanti in spirali fisse nello spazio. Basta ricorrere a due o più correnti alternative aventi l'una rispetto all'altra una determinata specifica differenza di fase. Il caso pratico importante è quello in cui si fa uso di tre correnti spostate di fase l'una rispetto all'altra di 120°.

Allora evidentemente le direzioni dei tre campi magnetici alternativi componenti, prodotti dalle tre correnti, debbono fare fra di loro degli angoli di 120°.

E le spirali induttrici percorse rispettivamente dalle tre correnti spostate di fase di 120° potranno venire collegate fra di loro a *concatenamento aperto* (a stella) rappresentato dall'avvolgimento dell'indotto di una macchina Thomson-Houston per lampade ad arco in serie: oppure a *concatenamento chiuso* (a triangolo) rappresentato dall'avvolgimento di un anello di Pacinotti con tre sole spirali elementari.

Questo è il caso del motore a *induzione trifase* a correnti concatenate, che ha oggi tanta importanza nelle ordinarie distribuzioni elettriche dell'energia con correnti alternative.

Consideriamo intanto il caso semplice di due vettori alternativi componenti: perchè la loro risultante sia un vettore rotante, la condizione necessaria e sufficiente è che i due vettori abbiano ampiezze uguali e presentino l'uno rispetto all'altro uno spostamento di fase il cui valore angolare sia uguale al supplemento dell'angolo che fanno fra di loro le rispettive direzioni dei due vettori componenti. Nel caso particolare in cui i due vettori siano normali l'uno all'altro, lo spostamento di fase di cui si è detto fra i due vettori componenti dovrà essere uguale. a 90°.

Si ha infatti:

$$x = A \cos 2\pi n t,$$
$$y = A \operatorname{sen} 2\pi n t;$$

e quindi:

$$x^2 + y^2 = A^2$$

Quanto si è detto per due vettori, si può applicare a due campi magnetici. Con due campi magnetici di direzione fissa, normali l'uno all'altro e presentanti una differenza di fase di un quarto di periodo, si può avere dalla loro sovrapposizione un campo magnetico risultante la cui intensità è costante, e la cui direzione è rotante. Il campo magnetico rotante

Digitized by Google

che così risulta è uguale a quello che si genera fra i due poli di una calamita o di un'elettrocalamita posta meccanicamente in rotazione. Si può quindi inviare una delle due correnti date in una spirale

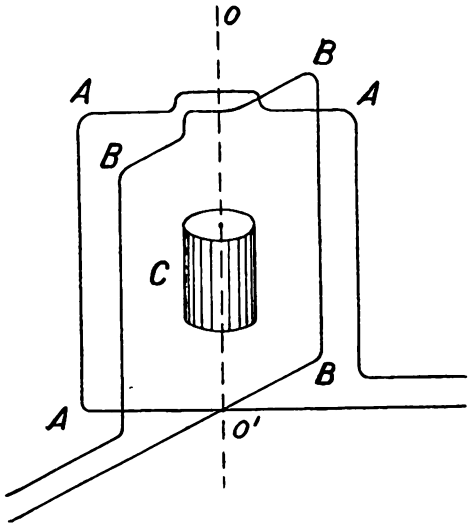


Fig. 5.

AAA l'altra corrente alternativa in una seconda spirale *BBB* perpendicolare alla prima (figura 5). Nello spazio in cui due campi si sovrappongono, essi si compongono in un campo d'intensità costante e di direzione rotante.

È ora naturale che con un campo magnetico rotante così generato si possa produrre la rotazione di un cilindro metallico *C*, intorno all'asse *OO'* del sistema delle due spirali, precisamente come se un magnete fosse fatto rotare intorno all'asse di rotazione dei piani delle due spirali.

Ricordiamo l'esperienza elementare con cui si pone in rotazione un disco di rame facendo rotare in vicinanza di esso una calamita, o viceversa. È questa l'antica e classica esperienza di Babbage e Herschel, che si ripete in tutti i corsi di fisica.

Così operando si viene a generare nel disco di rame delle correnti su cui il magnete esercita delle forze : e per la legge di Lenz il disco o cilindro prende a rotare nel senso del campo magnetico. Lo stesso fenomeno avviene naturalmente con un qualsiasi campo magnetico rotante : in qualunque modo esso venga generato. Ecco il principio fondamentale. Se si inverte la fase di una delle due correnti, si inverte la rotazione del campo, e quindi anche la rotazione del disco o cilindro di rame.

Si ha così un motore a corrente alternativa — e particolarmente il *motore a induzione bifase* — che non è sincrono e che può quindi avviarsi da sè, e che è più semplice dei motori a corrente continua, perchè la parte in movimento non ha bisogno di nessun collettore e di nessun contatto strisciante.

Come sia nato il meraviglioso principio del « Campo magnetico rotante », come esso sia emerso nella mente divinatrice di Galileo Ferraris, già ebbi a narrare distesamente nella commemorazione da me fatta il 7 Marzo 1897 a Torino, all'Assemblea generale della Associazione Elettrotecnica Italiana (1).

Una sera dell'agosto dell'anno 1885, il sommo ed immortale Maestro, riflettendo intorno all'analogia dei fenomeni ottici ed elettromagnetici, ed all'origine della luce polarizzata elettricamente e circolarmente, la quale riposa sulla combinazione di due movimenti oscillatori dell'etere, e procedendo per naturale illazione, egli intravide con la fulminea percezione del Genio, che — mediante la sovrapposizione di due campi magnetici prodotti da due correnti alternative circolanti in spirali immobili — si sarebbe potuto generare un campo magnetico rotante, ed ottenere quindi con questo tutti gli effetti — e fra gli altri i fenomeni d'induzione — che si hanno per mezzo della rotazione di un magnete.

La grande scoperta del campo magnetico rotante era fatta. In quella sera memoranda il genio inventivo di Galileo Ferraris era riuscito a leggere nel misterioso libro della Natura una delle sue splendide pagine, e l'Umanità acquistava un nuovo principio fecondo delle più grandiose e svariate applicazioni.

Il campo magnetico rotante fu per Galileo Ferraris come una rivelazione istantanea, fatidica ; ma quanta intuizione di genio, quanta forza di percezione intellettiva si sviluppò d'un tratto nella mente di quel profondo pensatore nell'atto di scoprire quel nuovo principio che doveva arrecare tanta luce nel mondo della scienza !

Poche scoperte come quella del campo rotante, scaturirono così naturali e furono così razionalmente concepite e sviluppate, frutto non del caso, ma esclusivamente del forte ingegno e del profondo studio.

Ad essa il Ferraris non giunse, nè per caso, nè per un vago intuito, ma per la grande, multiforme coltura del suo spirito, per la geniale comprensione dei fenomeni fisici, e finalmente per quell'ordine particolare di idee, che Egli seguì sempre in tutte le sue ricerche. A Lui servì di base il concetto, che tanto gli era famigliare, dell'analogia dei fenomeni ottici ed elettro-magnetici : e a Lui giovò moltissimo l'intima conoscenza dei fenomeni luminosi e il fascino grandissimo che lo trascinava a quegli studi. La sua profonda e sicura conoscenza della trattazione matematica dei fenomeni fisici periodici lo guidò nello studio delle ondulazioni acustiche, e già nelle sue Memorie sulla tempera dei suoni e sulle correnti telefoniche, Egli mostrava la sua famigliarità con quel fenomeno della differenza di fase, che tanto genialmente scoprì nel trasformatore e applicò nel suo campo rotante.

Dall'apparecchio classico e, dirò così, scientifico, che servì al Ferraris per verificare il meraviglioso suo concetto, si passa con tutta facilità al motore industriale, che il Ferraris stesso fece poscia costruire,

(1) Vedi anche : Discorso pronunciato in occasione dell'inaugurazione del Monumento a Galileo Ferraris in Livorno, Ferraris il 18 maggio 1902 ; *Sulla priorità della scoperta del campo magnetico rotante*. Discorso pronunciato in occasione della celebrazione di Galileo Ferraris in Torino - *In memoria di Galileo Ferraris*. Discorso pronunciato il 29 giugno 1925 a Livorno Ferraris. - *Sulla genesi della trasmissione dell'energia elettrica*. Conferenza tenuta al Collegio degli Ingegneri ed Architetti di Milano il . . . . . 1926.

Digitized by Google

non occorrendo perciò che disporre tutto il sistema — del cilindro e delle spirali — in uno spazio occupato, per quanto è possibile, da materiale magnetico.

Il più semplice è il primo modello messo insieme dall'ingegno impaziente di vedere attuata una delle sue grandi concezioni: quello a cui il genio potente chiese febbricitante la conferma, la prova della realtà di ciò che la mente aveva divinato, in quegli istanti in cui l'intima soddisfazione, la viva gioia del risultato sperato fa quasi dubitare che non abbiano ad essere che un sogno le speranze concepite, una illusione i risultati ottenuti.

Sono due spirali di filo di rame disposte fra di loro ad angolo retto di cui l'una rappresentata da una bobina, estratta nella fretta di operare da un galvanometro di Wiedemann, e l'altra avvolta sopra un piccolo telaio di legno: nello spazio da esse racchiuso, e coll'asse coincidente coll'intersezione dei piani mediani, è sospeso un piccolo cilindro di rame, vuoto e chiuso, sostenuto da un filo.

In seguito il Ferraris, invece di sospendere il cilindro conduttore, lo fece portare da un albero metallico appoggiato su cuscinetti: e dando all'apparecchio maggiori dimensioni, ne formò due piccoli motori, di cui l'uno ad asse orizzontale e l'altro ad asse verticale. Infine, raccoltosi in nuovi studi, avido di perfezionamenti, di utili e pratici risultati, realizzò nell'ultimo dei suoi Cimeli, il vero motore industriale praticamente completo.

Le esperienze fondamentali con cui furono luminosamente confermate le ingegnose previsioni, e che Galileo Ferraris eseguì nei mesi di agosto e settembre dell'anno 1885, sono descritte nella classica Memoria « Sulle rotazioni elettrodinamiche prodotte per mezzo di correnti alternate », pubblicata nel volume XXIII degli atti dell'Accademia delle Scienze di Torino il 18 marzo 1888.

I sacri Cimelii già ebbero sanzione di gloria e di ammirazione alla grande Mostra internazionale di Chicago nel 1893; ed oggi essi sono gelosamente custoditi nella R. Scuola di Applicazione degli Ingegneri di Torino, ove venne realizzata la grande scoperta.

Per produrre le due correnti spostate di fase, si può adoperare un'unica corrente alternativa, producendo per mezzo di essa l'altra corrente: ciò che precisamente fece Galileo Ferraris nelle sue memorabili e classiche esperienze fondamentali.

Per ottenere le due correnti sfasate si può ricorrere a diversi artifizi. L'uno consiste nel suddividere la corrente data in due circuiti derivati, inserendo nell'uno una grande resistenza ohmica e nell'altro circuito una grande resistenza induttiva e piccola resistenza ohmica.

Un altro artifizio consiste nell'adoperare per generare l'uno dei due campi magnetici alternativi la corrente alternativa data, e per generare l'altro campo magnetico la corrente secondaria di un trasformatore, nel circuito secondario del quale venga inserita una grande resistenza ohmica.

Più esattamente il problema può venire ancora risolto facendo uso di due circuiti derivati nell'uno dei quali venga inserito un condensatore e nell'altro una spirale presentante una grande resistenza induttiva.

In questo caso si può allora ottenere esattamente lo spostamento di fase di 90°.

Noi tratteremo ora il caso generale supponendo un'armatura costituita di tante spire o spirali elementari tutte uguali fra di loro, e poste in tanti piani diametrali, così da costituire un sistema assolutamente simmetrico rispetto all'asse dell'apparecchio.

Ciascuna spira o spirale elementare è chiusa su sè stessa. Nel caso particolare dell'armatura a *gabbia* ciascuna spira è costituita da una coppia di sbarre diametralmente opposte, e da due dischi, l'uno superiore e l'altro inferiore, che uniscono elettricamente fra di loro le varie coppie di sbarre.

Per renderci conto delle proprietà del motore, noi dobbiamo vedere quali forze elettromotrici in grazia della rotazione si producono, quali correnti circolano nelle spirali in grazia di dette forze elettromotrici, quali siano le lamine magnetiche equivalenti a queste correnti, e finalmente quale il vettore A che rappresenta il momento magnetico del magnete equivalente al complesso delle spirali costituenti l'armatura.

Orbene, serviamoci perciò delle seguenti notazioni. Diciamo S la superficie di una delle spirali elementari (somma delle superfici delle spire che la costituiscono); r la resistenza ohmica; L l'induttanza o coefficiente di autoinduzione, che per la teoria elementare che intendiamo svolgere supporremo costante; α l'angolo che nell'istante considerato, alla fine del tempo t il campo magnetico rotante di induzione OB, in cui è collocata l'armatura, fa con la normale ON al piano della spirale (fig. 6).

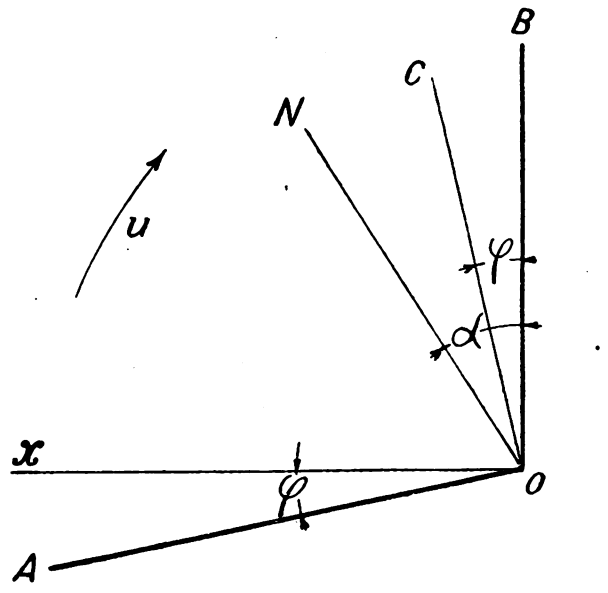


Fig. 6.

Diciamo u la frequenza con la quale il campo magnetico rotante ruota relativamente all'armatura, vale a dire la frequenza del moto relativo, al quale è dovuto la forza elettromotrice d'induzione.

Detta n la frequenza del campo magnetico ro-

Digitized by Google

tante ed m la frequenza di rotazione dell'armatura si ha:

$$u = n - m.$$

E poichè nella pratica si usa considerare il rapporto fra la frequenza del moto relativo a quella del campo rotante — rapporto che si chiama *scorrimento* e che indicheremo con s — si può ancora scrivere:

$$s = \frac{n - m}{n} = \frac{u}{n}.$$

Nei casi ordinari della pratica industriale, lo scorrimento a carico normale, è compreso fra il 2 ed il 4 %.

Sia infine B il valore dell'induzione magnetica nel campo magnetico rotante.

Alla fine del tempo t nell'istante considerato passa dentro la spirale S un flusso d'induzione:

$$\Phi = S\,B\,\cos\alpha\,;\ \text{onde:}$$

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\,S\,B\,\operatorname{sen}\alpha\,\frac{d\alpha}{dt};$$

ma $\frac{d\alpha}{dt}$ è la velocità angolare del moto relativo:

$$\frac{d\alpha}{dt} = 2\,\pi\,u.$$

Quindi:

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\,2\,\pi\,u\,S\,B\,\operatorname{sen}\alpha.$$

Ora la forza elettromotrice d'induzione e che si ha nella spirale elementare nell'istante considerato, è uguale a $-\frac{d\Phi}{dt}$, per cui si scrive:

$$e = 2\,\pi\,u\,S\,B\,\operatorname{sen}\alpha.$$

Siccome la spirale è chiusa, la forza elettromotrice e produce nella spirale stessa una corrente di intensità i data dalla legge di Ohm per le correnti alternative:

$$i = \frac{2\,\pi\,u}{\rho}\,S\,B\,\operatorname{sen}(\alpha - \varphi),$$

ove ρ è l'impedenza della spirale e φ il ritardo di fase di i rispetto ad e, dovuto alla induttanza L della spirale stessa:

$$\rho = \sqrt{r^2 + 4\,\pi^2\,L^2\,u^2},$$

$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{2\,\pi\,L\,u}{r}.$$

Ora questa corrente è equivalente ad una lamina magnetica di potenza magnetica $P = i$; ed il momento magnetico del magnete equivalente alla corrente percorrente la spirale elementare è uguale a $S\,i$.

Dunque la spirale S percorsa dalla corrente i è equivalente ad un magnete, del quale il momento magnetico è:

$$S\,i = \frac{2\,\pi\,u}{\rho}\,S^2\,B\operatorname{sen}(\alpha - \varphi).$$

E questo è il momento magnetico che noi immaginiamo rappresentato dal vettore che ha la direzione della normale $O\,N$.

Ora tutto quanto abbiamo detto per questa spirale elementare, noi possiamo dire per tutte le spirali elementari costituenti l'armatura. La sola cosa diversa per le singole spirali elementari è l'angolo α, che varia regolarmente fra o e $2\,\pi$, assumendo tutti i valori possibili compresi fra questi limiti.

L'insieme di tutte le spirali elementari equivale dunque ad un magnete costituito da tutte le lamine magnetiche che così vengono considerate, il momento magnetico del quale è rappresentato dal vettore risultante da tutti quelli che alla loro volta rappresentano i momenti magnetici delle singole spirali elementari.

Per la facile composizione di tutti questi vettori, facciamo la proiezione del vettore risultante, che vogliamo rappresentare, sopra la retta $O\,C$ che fa con $O\,B$, nell'istante considerato, l'angolo φ.

Si ricava:

$$\frac{2\,\pi\,u}{\rho}\,S^2\,B\operatorname{sen}(\alpha - \varphi)\cos(\alpha - \varphi).$$

Facciamo similmente la proiezione del medesimo vettore sulla retta $O\,A$ perpendicolare ad $O\,C$:

$$\frac{2\,\pi\,u}{\rho}\,S^2\,B\operatorname{sen}^2(\alpha - \varphi).$$

E supponiamo ora che α vari regolarmente per gradi fra o e 2π. Si ricavano allora le due seguenti espressioni che danno rispettivamente i valori medi rispetto ad α delle due proiezioni:

$$\frac{u}{\rho}\,S^2\,B\int_0^{2\pi}\operatorname{sen}(\alpha - \varphi)\cos(\alpha - \varphi)\,d\alpha;$$

$$\frac{u}{\rho}\,S^2\,B\int_0^{2\pi}\operatorname{sen}^2(\alpha - \varphi)\,d\alpha.$$

Facendo la prima e la seconda integrazione si trova rispettivamente o e π: ciò che equivale a dire che il valore medio della proiezione su $O\,C$ è zero, mentre quello su $O\,A$ vale:

$$\frac{\pi\,u}{\rho}\,S^2\,B.$$

E tenendo conto che il numero delle spirali elementari è N, ne risulta che il valore medio della proiezione del vettore risultante su $O\,C$ è zero, mentre quello su $O\,A$ è:

$$\frac{\pi\,N\,S^2\,B}{\rho}\,u.$$

Il quale vettore noi rappresenteremo in figura con $O\,A$ di lunghezza $\frac{\pi\,N\,S^2\,B}{\rho}\,u$ e facente l'angolo $\left(\frac{\pi}{2} + \varphi\right)$ con $O\,B$.

Digitized by Google

Tiriamo dal punto O la retta OX normale ad OB e facente con OA l'angolo φ. Il magnete equivalente all'armatura nell'istante considerato, ha la direzione OA perpendicolare ad OC, ed il momento magnetico:

$$A = \frac{\pi N S^2 B}{\rho} u.$$

Ora la coppia di rotazione del motore ha per momento:

$K = A B \operatorname{sen} A \hat{O} B$, ossia:

$K = A B \cos \varphi$.

E sostituendo ad A il valore trovato:

$$K = \frac{\pi N S^2 B^2}{\rho} u \cos \varphi.$$

Ma $\cos \varphi$ in funzione di r e di ρ è dato da:

$$\cos \varphi = \frac{r}{\rho}.$$

Dunque si può ancora scrivere:

$$K = \pi N S^2 B^2 \frac{u r}{\rho^2}.$$

Od ancora sostituendo a ρ il suo valore:

$$K = \pi N S^2 B^2 \frac{u r}{r^2 + 4 \pi^2 L^2 u^2}.$$

Questa è l'equazione della caratteristica del motore: e cioè l'equazione della linea che ha per ordinate i valori di K e per ascisse i valori di u.

È facile vedere l'andamento della linea stessa nel sistema di assi coordinati rappresentato nella figura 7.

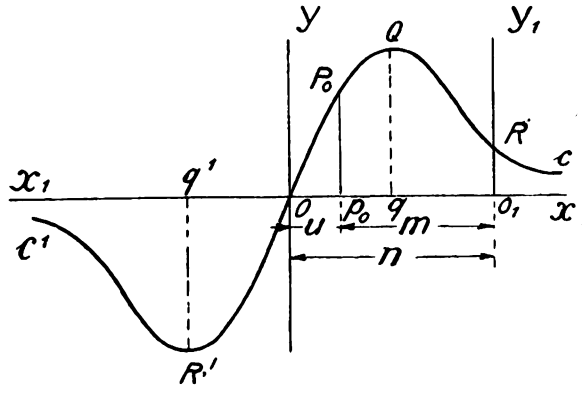


Fig. 7.

Si vede subito che la linea si compone di due rami OQC e $OQ'C'$ — l'uno corrispondente alle ascisse positive, e l'altro alle ascisse negative — omotetici rispetto ad O. La linea passa per l'origine delle coordinate e tende assintoticamente verso zero, tanto dalla parte positiva quanto dalla negativa.

La linea infine ha due ordinate massime, l'una positiva e l'altra negativa.

Si possono anche subito ricavare i valori delle ascisse Oq e Oq' corrispondenti ai massimi valori qQ e $q'Q'$ di K.

Se dividiamo per u numeratore e denominatore nell'espressione di K, si ottiene infatti:

$$K = \pi N S^2 B^2 \frac{r}{\frac{r^2}{u} + 4 \pi^2 L^2 u}$$

Si tratta dunque di rendere minima la somma dei due termini $\frac{r^2}{u}$ e $4 \pi^2 L^2 u$, il cui prodotto è costante.

Ciò si verifica quando i due termini stessi sono uguali, vale a dire:

$$\frac{r^2}{u} = 4 \pi^2 L^2 u,$$

ossia:

$$u = \pm \frac{r}{2 \pi L}.$$

È facile ancora vedere che O è un punto di flesso, vale a dire che la curvatura in O è zero. Dunque per un certo tratto la linea si confonde con una linea retta. Ed il tratto rettilineo della linea è tanto più lungo quanto più piccola è l'induttanza L: al limite per $L = 0$ (caso del motore elettrodinamico) la linea si trasforma semplicemente in una linea retta.

La curvatura della linea e la sua inclinazione verso l'asse delle ascisse, delle due parti rispetto all'asse delle ordinate, è effetto della induttanza L: ed è tanto meno notevole quanto più è piccolo il valore di L. Se invece L è molto grande ed r piccolo, la linea sale con grande pendenza e poi discende verso l'asse delle ascisse.

Quest'ultimo caso rappresenta quello che si verifica nella pratica industriale per gli ordinari motori a induzione (vedi figura).

Questa linea ci esprime la relazione fra K ed u; ma quello che a noi interessa è la relazione fra K e la frequenza m di rotazione dell'armatura.

È chiaro che rispetto al campo rotante l'armatura ruota con la frequenza:

$$u = n - m.$$

Si può dunque scrivere:

$$K = \pi N S^2 B^2 \frac{r (n - m)}{r^2 + 4 \pi^2 L^2 (n - m)^2}.$$

Questa è la formula che compendia le proprietà fondamentali del motore.

Ora la rappresentazione grafica della relazione stessa, che è quanto dire la caratteristica del motore, la linea cioè che ha per ascisse i valori di m e per ordinate i valori di K, si può dedurre subito dalla linea già tracciata: anzi quest'ultima è ancora la linea che cerchiamo alla sola condizione che essa sia riferita ad altri assi e ad altra origine.

Digitized by Google

Basta perciò portare sull'asse della ascisse una lunghezza $O\,O_1 = n$ e considerare un punto P qualunque della linea di ascisse $O\,p = u$. È chiaro che $p\,O_1$ rappresenterà $n - u = m$: cosicchè la linea che cerchiamo è la linea già tracciata alla sola condizione di prendere origine delle coordinate il punto O_1, e come asse delle ordinate $O_1\,Y_1$, ed infine come direzione positiva dell'asse delle ascisse la $O_1\,X_1$.

Ora qui bisogna distinguere due casi, e cioè:

$$\begin{cases} n \leqq O\,q, \text{ ossia } n \leqq \dfrac{r}{2\,\pi\,L}, \\ n > O\,q, \text{ ossia } n > \dfrac{r}{2\,\pi\,L}. \end{cases}$$

Nel primo caso K ha il valore massimo per $m = o$: e perciò in questo caso il momento della coppia di rotazione del motore è massimo quando il motore è fermo. Non soltanto dunque in questo caso particolare il motore si avvia da sè, ma esso si avvia col massimo valore di K, mentre poi K diminuisce col crescere della velocità del motore. Infine il funzionamento del motore è sempre stabile.

Per l'altro caso di $n > \dfrac{r}{2\,\pi\,L}$, rappresentato in figura, succede invece che per $m = o$ il momento della coppia di rotazione del motore è diverso da O, ma non è massimo: esso va crescendo col crescere della velocità fino ad un massimo corrispondente all'ascissa $O_1\,q$, e poi va diminuendo. In questo caso il motore non si avvia che con un carico minore del suo carico massimo. Il funzionamento del motore è allora stabile soltanto per velocità superiori ad un certo limite, e precisamente in corrispondenza di valori di m maggiori di $O_1\,q$.

Nella ordinaria pratica il valore di r è sempre assai poccolo, ed il valore di L sempre abbastanza grande, così che sempre accade che il motore si trova nelle condizioni del secondo caso, e cioè di $n > \dfrac{r}{2\,\pi\,L}$.

Ed allora si provvede all'avviamento del motore sotto forte carico, ed anche a pieno carico, inserendo nell'armatura una conveniente resistenza ohmica, di cui è facile calcolare il valore per le condizioni dell'avviamento a pieno carico. Basta perciò che tale resistenza addizionale abbia tale valore che la resistenza r complessiva dell'armatura soddisfi alla condizione:

$$n = \frac{r}{2\,\pi\,L}, \quad \text{ossia:}$$

$$r = 2\,\pi\,n\,L.$$

La linea i punti della quale hanno per ordinate i valori del momento K della coppia motrice di un motore a campo Ferraris, e per ascisse i valori della velocità relativa $u = n - m$ (fig. 7), ci dice chiaramente che la macchina può funzionare come generatore asincrono, allorquando si prendano a considerare i valori negativi di u, vale a dire per velocità $m > n$. In tal caso infatti *la coppia* diventa negativa e varia secondo il ramo della curva a sinistra dell'asse delle ordinate, omotetico rispetto al ramo positivo.

L'invenzione del motore a campo magnetico rotante, come tutte quelle che hanno portato grandi rivolgimenti nella tecnica, viene rivendicata dalle principali grandi Nazioni, ciascuna delle quali vanta qualche precedenza sia nel campo teorico che nell'attuazione pratica di essa; ma nessuna può contestare all'Italia la grande scoperta di Galileo Ferraris del principio del campo Ferraris, la sua perfetta spiegazione teorica e la sua applicazione pratica nei modelli costrutti e sperimentati fin dall'anno 1885, i quali servirono di base alla costruzione di quei motori industriali che fecero poi la loro mirabile prova nella prima trasmissione elettrica dell'energia a grande distanza con correnti polifasi da Lauffen a Francoforte nel 1891.

Ancora recentemente, dal Lamme che ebbe molta parte nello sviluppo dei motori a induzione, fu rivendicata a torto a Nicola Tesla la priorità dell'invenzione.

Due fatti basterebbero a confutare l'asserzione. Il primo concerne il concetto stesso su cui il Tesla costruì i suoi primi motori che non erano altro che a corrente alternata *sincroni*, dei quali ne era facilitato l'avviamento e migliorato il funzionamento in grazia di una conveniente *rotazione di poli*. Il secondo fatto è che il brevetto del Tesla non data che dal maggio 1888, quasi tre anni dopo i classici esperimenti di Galileo Ferraris (1).

L'idea geniale del sommo Maestro veniva subito sviluppata industrialmente dai fratelli Charles e Sidney Brown ad Oerlikon; Zipernowsky, Déri e Blàthy della Casa Ganz a Budapest: von Dolivo-Dobrowolski della « Allgemeine Elektricitats Gesellschaft »; dal Georges in .Germania: dal Wenstrom in Isvezia.

Un campo che sembrava escluso al motore polifase, quello della trazione ferroviaria fu per iniziativa italiana, e precisamente dalla ex Società Adriatica, per merito speciale dell'Ing. von Kando, vittoriosamente conquistato — vincendo difficoltà tecniche e sopratutto pregiudizi innumerevoli — col classico esperimento eseguito fin dall'anno 1902 sulle linee valtellinesi.

Altre applicazioni importanti dei motori a campo Ferraris sono state fatte in America per opera di Alexanderson nel sistema di trazione elettrica a corrente alternativa monofase proposto fin dall'anno 1896 da Galileo Ferraris e dall'Autore, il quale sistema riposa sull'impiego dei trasformatori a spostamento di fase Ferraris-Arnò.

Regolazione della velocità dei motori a campo Ferraris.

È appunto essenzialmente per l'applicazione alla trazione elettrica che si è presentata la grave questione della regolazione della velocità dei motori a campo Ferraris.

Da quanto è stato detto risulta che in tali motori

(1) Vedi *Cenni sui motori elettrici a campo magnetico rotante*, R. ARNÒ (*L'Ingegneria Civile e le Arti Industriali*) Vol. XVIII; 1892.

Digitized by Google

la coppia d'avviamento si regola con resistenze inserite nel rotore: e che precisamente si può ottenere la coppia massima sia con velocità nulla, sia con qualunque numero di giri; mentre però la velocità di regime deve essere assai prossima al sincronismo, col rotore in corto circuito. L'inserzione continua di resistenze per ridurre la velocità ha il grave inconveniente di abbassare assai il rendimento. Mentre dunque le piccole variazioni di velocità si possono ottenere con resistenze, le grandi variazioni richiedono disposizioni speciali, le quali anche permettono solo di ottenere alcune determinate velocità. Precisamente una regolazione saltuaria può ottenersi mediante il diverso numero dei poli, od il raggruppamento diverso degli avvolgimenti, o per mezzo della *disposizione dell'Ing. Goerges a tandem od in cascata di due motori.*

Allo statore dell'uno si applica la tensione di linea: mentre lo statore dell'altro è alimentato dalla corrente che si raccoglie, mediante anelli e spazzole, dal rotore del primo. Se n è la frequenza di rotazione del campo rotante, m quella del primo motore, la corrente prodotta dal suo rotore avrà la frequenza $u = n - m$, e questa è anche la frequenza con la quale ruota il campo del secondo motore. E poichè i due motori sono rigidamente collegati l'uno all'altro, il rotore del secondo motore gira con velocità m come il primo: onde la frequenza relativa p del secondo rotore rispetto al suo campo risulta:

$$p = u - m = n - 2\,m.$$

Per cui si ricava l'espressione della frequenza di rotazione comune dei due motori:

$$m = \frac{n}{2} - \frac{p}{2}$$

Ne consegue che, essendo piccolo lo scorrimento del secondo motore, la velocità che assume il sistema è come la metà di quella che ha ciascun motore se alimentato direttamente dalla linea.

Per le speciali condizioni in cui debbono funzionare i due motori così accoppiati, è chiaro che l'effetto utile del sistema risulta assai scarso.

Fattore di potenza dei motori a campo Ferraris.

Il motore a campo Ferraris può essere considerato come un vero e proprio trasformatore. È vero che è diversa la causa che origina l'aumento delle correnti nel secondario, poichè nel caso del motore è il maggiore scorrimento, mentre nel caso del trasformatore è la minore impedenza del circuito esterno; ma in essenza il fenomeno del trasporto dell'energia da un circuito all'altro e quello della autoregolazione avvengono in modo identico.

Nel caso del motore asincrono però, non si può più considerare, come nel trasformatore, praticamente costante il flusso magnetico attraverso l'intero circuito magnetico; ma nel solo statore, perchè il flusso del rotore, da cui dipende la forza elettromotrice indotta, è notevolmente inferiore, causa l'intraferro e le conseguenti fughe magnetiche: e va crescendo col crescere del carico.

Ne consegue anche che il fattore di potenza del circuito dello statore, correlativo al ritardo di fase tra correnti e tensioni, è piccolissimo a vuoto, e va gradatamente aumentando col crescere del carico.

Motori asincroni a fattore di potenza uguale all'unità.

Per sopprimere il ritardo di fase della corrente che alimenta un motore asincrono rispetto la tensione attiva occorre provvedere alla produzione di una corrente magnetizzante in guisa da annullare la componente in quadratura sulla linea.

D'altra parte il motore asincrono comportandosi come un trasformatore, è chiaro come la eccitazione del suo campo magnetico sia fatta, invece che dalla parte dello statore, dalla parte del rotore — che dovrà allora essere necessariamente del tipo ad avvolgimento con anelli e spazzole — con una corrente di fase opportuna, alla frequenza che è propria al rotore, e quindi variabile col carico.

Ora i dispositivi destinati alla soluzione dell'importante problema si possono riassumere come segue:

a) Condensatore statico od elettrolitico;
b) Motore sincrono sovraeccitato;
c) Motore asincrono sincronizzato;
d) Motore autosincrono compensato Sartori;
e) Motore asincrono autocompensato Sartori;
f) Macchine speciali eccitatrici il cui circuito è incluso in quello del rotore del motore: fra queste l'eccitatrice Scherbius e l'eccitatrice Kapp, che hanno ricevuto le maggiori applicazioni pratiche.

Motore asincrono sincronizzato.

Consideriamo un motore asincrono, nel quale la corrente alternata si mandi nello statore e la corente continua nel rotore, che può anche essere del tipo cosidetto liscio ad avvolgimento distribuito. Se questo avvolgimento è del tipo trifase, esso può ugualmente ricevere la corrente continua di eccitazione, ottenendo una polarità opportuna: e precisamente introducendo la corrente continua per una fase e facendola uscire per le altre due; oppure utilizzando solo due fasi; ed infine invertendo, dopo l'operazione di avviamento, le connessioni di una delle fasi e facendole percorrere tutte e tre dalla corrente continua. Ne consegue che una struttura asincrona, vale a dire avvolgimento distribuito sullo statore e sul rotore, può servire per ottenere un motore sincrono, col precipuo vantaggio di poter avviare la macchina, anche sotto forte coppia resistente, come asincrona, mercè il solito reostato di avviamento.

Su questo concetto sono appunto fondati i cosidetti *motori asincroni sincronizzati.*

Motore autosincrono compensato Sartori.

Se in un ordinario motore asincrono si invertono le funzioni delle due parti costitutive, collegando il

Digitized by Google

rotore alla rete e chiudendo il secondario in corto circuito, nulla si modifica nel funzionamento; ma il campo rotante assume nell'interferro e nel ferro dello statore la pulsazione propria dello scorrimento. Se ora, in queste condizioni, un avvolgimento Pacinotti ausiliario, provvisto di collettore e spazzole, trovasi sul rotore — ciò che equivale a dire che nel rotore del motore venga ad essere conglobata l'eccitatrice —, si ottiene evidentemente un primo notevole perfezionamento in semplicità ed in effetto utile sia per perdite meccaniche che per perdite di carattere elettrico e magnetico.

Ma una tale macchina gode della singolare proprietà di poter provvedere all'aumento automatico della eccitazione col crescere del carico.

Mandando la corrente trifase nel rotore, quando la macchina è sincronizzata, i poli dell'armatura viaggiano nello spazio con velocità angolare uguale ed opposta di quella da cui è animata l'armatura: perciò essi rimangono fissi nello spazio, ed una tensione continua si stabilisce quindi alle spazzole del collettore. Ma i poli dell'armatura, pure restando fissi nello spazio, si calettano diversamente a seconda del carico rispetto alla direzione del flusso principale proveniente dall'induttore. Perciò dando alle spazzole sul collettore un opportuno calettamento, ne consegue che il flusso che si concatena col circuito elettrico della eccitatrice, per effetto del diverso calettamento dei poli dell'armatura, va gradatamente aumentando col crescere del carico. Con ciò cresce la tensione alle spazzole del collettore, e in conseguenza l'eccitazione dell'induttore, come si conviene per poter lavorare sempre con un buon fattore di potenza.

Motore asincrono autocompensato Sartori.

Il motore asincrono autocompensato è stato concepito dal Prof. Sartori come conseguenza naturale e spontanea del motore autosincrono compensato: e quindi parecchio in anticipo sui tipi di motori analoghi che oggi sono stati con successo posti sul mercato da importanti Ditte germaniche.

Ecco infatti come con tutta facilità si possa passare da questo a quell' altro tipo di motore.

Se in un motore a induzione costituito come l'autosincrono compensato, collochiamo tre spazzole a 120° anzichè due a 180°, una volta effettuato l'avviamento, si viene a disporre di una terna di forze elettromotrici (sistema trifase), anzichè di una sola forza elettromotrice alternativa; e poichè queste hanno la frequenza corrispondente allo scorrimento, esattamente come quelle prodotte nel secondario (fisso) dal campo rotante, ed è inoltre possibile orientarle a piacimento con l'opportuno calettamento delle spazzole, si potrà fare agire congiuntamente le due nel secondario, col risultato di poter dare alla terna di correnti nel secondario fase opportuna e quindi funzione magnetizzante, con la conseguente compensazione della macchina, che conserva in tale caso carattere asincrono: e ciò alla sola condizione di dare alla terna di spazzole sul collettore l'opportuno calettamento.

Eccitatrice Scherbius.

Prendiamo a considerare una ordinaria armatura Pacinotti sul collettore della quale siano disposte tre spazzole equidistanti congiunte ad una sorgente di corrente trifasica, e precisamente al rotore di un motore asincrono. E sia detta armatura collocata in uno statore lamellato, ma sprovvisto di qualsiasi avvolgimento.

Ora l'armatura stessa, finchè è supposta ferma, si comporta come un'ordinaria bobina induttiva trifase, e le forze elettromotrici di autoinduzione che in essa si generano hanno la stessa frequenza delle correnti che alimentano l'armatura.

Se l'avvolgimento del compensatore è in movimento, allora per velocità uguale a quella del campo e cioè per il caso del sincronismo, ogni forza elettromotrice, tanto di autoinduzione quanto dinamica, scompare: è cioè raggiunta la compensazione della reattanza dell'armatura Pacinotti.

Per velocità minore o superiore invece il compensatore offre rispettivamente una reattanza positiva o negativa. Ed è appunto in quest'ultimo caso che detta reattanza negativa, dipendente dalla velocità differenziale, agisce nel senso di anticipare la fase delle correnti rispetto alle rispettive forze elettromotrici: cosicchè l'armatura a collettore dell'eccitatore si comporterà come una capacità, e potrà fornire una potenza reattiva al circuito in cui essa trovasi inserita.

Per quanto riguarda la costruzione della macchina, anzichè provvedere l'armatura di uno statore senza avvolgimento, si potrà sopprimere addirittura lo statore facendo un'armatura corazzata, internando cioè l'avvolgimento entro fori praticati sul circolo mediano di un nucleo lamellato. E così si presenta la recente eccitatrice Scherbius, che è oggi applicata con successo dalla rinomata Ditta Brown Boveri ai motori di grande potenza.

È bene notare che nessuna difficoltà di ordine meccanico sussiste per far marciare la eccitatrice a velocità superiori al sincronismo, essendo sempre assai bassa la frequenza della corrente di alimentazione.

Eccitatrice Kapp.

Prendiamo a considerare un'ordinaria macchina a corrente continua bipolare, e supponiamo di inviare nell'induttore della macchina stessa una corrente continua e nell'indotto una corrente alternata di bassa frequenza. In tali condizioni quest'ultima si metterà a oscillare come un pendolo con la stessa frequenza. La massima velocità corrisponde al passaggio per la posizione d'equilibrio iniziale nell'istante in cui la corrente si annulla; mentre la massima escursione e la velocità zero corrisponde all'istante in cui la corrente è massima. Per effetto di questo movimento si provoca nel circuito dell'indotto oscillante una forza elettromotrice alternativa, che è in anticipo di un quarto di periodo rispetto alla corrente alternata.

Ora appunto il Kapp ha applicato questo apparecchio, che egli chiama *vibratore*, ad un motore a campo Ferraris, raccogliendo dal rotore di buesto le tre

Digitized by Google

correnti alternate di bassa frequenza, mediante anelli e spazzole, e adducendole mediante collettore e spazzole rispettivamente a tre armature oscillanti nel modo anzidetto, in campi di direzione e intensità costanti.

L'effetto del *vibratore Kapp* essendo quindi quello di far agire nel circuito di ciascuna fase del rotore una forza elettromotrice che precede di un quarto di periodo la corrente, ne consegue che nel rotore stesso alla corrente propria si aggiunge un componente in anticipo di fase di 90°, per cui la risultante assume una fase intermedia, ma sempre in avanzo notevole rispetto alla corrente propria.

Riuniamo adesso in un unico giogo magnetico tre induttori bipolari, provvisti di tre armature Pacinotti, montate alla loro volta sopra perni a sfere appoggiate a bracci sporgenti dalla carcassa: con che si ha l'eccitazione Kapp, nella sua forma industriale.

MOTORI A CAMPO MAGNETICO ROTANTE SINCRONI

(*B rotante; A rotante*)

Sono questi i motori sincroni polifasi, i quali — al pari dei motori sincroni a corrente alternata semplice — si prestano in modo perfetto quali macchine ricettrici nelle trasmissioni elettriche dell'energia a grande distanza; ma che non possono essere convenientemente applicati nelle ordinarie distribuzioni dell'energia elettrica.

Il motore sincrono polifase ha però il vantaggio — rispetto a quello monofase — di potersi avviare da sè, potendo esso funzionare, durante il periodo di avviamento, come un ordinario motore a induzione a campo Ferraris.

MOTORI ELETTRICI
A CAMPO MAGNETICO ALTERNATIVO.

Per la trattazione di questa categoria di motori per i quali il vettore B è alternativo, proponiamoci di fare tutte le ipotesi sulla natura del vettore A, tralasciando evidentemente il caso di A costante, essendo allora il valore medio del momento della coppia di rotazione $K = A\,B \operatorname{sen} \alpha$ uguale a zero: per cui non è possibile con tale combinazione costituire un motore.

MOTORE SINCRONO
INDOTTO FISSO E INDUTTORE MOBILE.

(*B alternativo, A rotante*)

Questo caso coincide con quello già considerato nella trattazione dei motori a campo magnetico costante (B costante), essendo A alternativo e rotante. Si ricava cioè ancora l'ordinario motore sincrono con la differenza che, mentre nel caso già trattato il motore è con induttore fisso e indotto mobile, qui invece risulta fisso l'indotto e mobile l'induttore.

MOTORE A CORRENTE ALTERNATA
A COLLETTORE.

(*B alternativo, A alternativo*)

Noi possiamo facilmente realizzare questo caso ricorrendo ad una ordinaria macchina a corrente continua, secondo il principio di Pacinotti, eccitata in serie. Infatti se noi scomponiamo i due vettori alternativi B ed A rispettivamente nei loro vettori componenti d_B, s_B; d_A, s_A rotanti destri e sinistri, si vede subito che i valori medi dei momenti delle coppie risultanti dalle combinazioni dei vettori rotanti destri coi sinistri, risultano uguali a zero; mentre in corrispondenza delle combinazioni di d_B con d_A e di s_B con s_A, i rispettivi valori medi dei momenti delle coppie risultanti sono diversi da zero, alla condizione però che le frequenze dei detti vettori rotanti siano le stesse, come è appunto il caso della macchina eccitata in serie in cui si manda un'unica corrente alternativa. Del resto questo noi già sapevamo in quanto che nello studio elementare delle macchine a corrente continua autoeccitatrici abbiamo visto come in tali macchine non varia il verso della rotazione col variare del verso della corrente.

Il motore a corrente alternata a collettore è stato per la prima volta studiato e costrutto industrialmente per grandi potenze dall'Ing. Giorgio Finzi: ed oggi questo motore ha ricevuto grandiose ed importanti applicazioni per la trazione elettrica.

Il motore è sempre multipolare; il nucleo dell'induttore lamellato; i poli sporgenti dalla carcassa verso l'interno.

I motori di questo tipo costruiti dalle varie Ditte differiscono essenzialmente pel modo col quale si provvede alla eliminazione o neutralizzazione della forza elettromotrice di autoinduzione dell'armatura: impiegando o dei *poli ausiliari compensatori o dei circuiti ammortitori disposti sullo statore.*

Per ridurre poi l'importanza del sistema induttore è opportuno impiegare poche spire, donde la convenienza della eccitazione in serie, e abbassare la frequenza della corrente di alimentazione. In causa della induttanza del motore, la corrente riesce sempre assai spostata di fase rispetto la tensione di alimentazione; ed il fattore di potenza, anche con l'impiego di correnti da 15 a 25 periodi per secondo, raramente supera 0,8.

Per una tensione data, la velocità del motore monofase in serie a collettore si adatta automaticamente alla coppia resistente, diminuendo gradatamente col crescere di questa, rimanendo la potenza pressochè invariata.

Ma mentre nel motore a corrente continua conviene assorbire passivamente tutto l'eccesso di tensione durante l'avviamento o durante il funzionamento a velocità ridotta; nel caso del motore monofase a collettore si può ricorrere ad un trasformatore statico a rapporto di trasformazione variabile, oppure ad un autotrasformatore. Ed è appunto in ciò che risiede uno dei maggiori pregi di questo motore e che lo rende particolarmente adatto alla trazione: e ciò anche perchè il motore si avvia spontaneamente sotto carico sviluppando la coppia motrice massima.

Digitized by Google

Finalmente occorre notare che la commutazione della corrente sotto le spazzole avviene in modo identico che per i motori a corrente continua; però la natura alternativa dei flussi in giuoco rende il fenomeno assai più complesso. Per quanto concerne i dispositivi che si possono impiegare nella costruzione dell'armatura per migliorare il fenomeno della commutazione è chiaro che intanto converrà suddividere quanto più è possibile il circuito dell'armatura disponendo un gran numero di lamelle sul collettore: con che evidentemente si riduce il numero delle spire che restano cortocircuitate durante la commutazione. Inoltre sarà opportuno dare una piccola larghezza alle spazzole nel senso periferico; e fare le connessioni tra le lamelle del collettore e le spire dell'armatura a mezzo di conduttori molto resistenti.

Infine si può migliorare grandemente il funzionamento del motore nei riguardi dello scintillamento ricorrendo a dei *poli di commutazione* destinati a generare nella spira che si commuta un forza elettromotrice favorevole al rovesciamento della corrente alternata. L'eccitazione di questi poli può essere fatta in serie o in derivazione, e la corrente corrispondente deve essere regolabile in fase ed in intensità a mezzo di resistenze induttive e resistenze ohmiche.

È chiaro che con l'impiego dei poli di commutazione, si potrà dare alle connessioni tra lamelle del collettore e spire dell'armatura la resistenza normale: evitando così l'impiego di forti resistenze, che rende la costruzione dell'armatura alquanto più difficile, mentre si accrescono le perdite ed aumenta il riscaldamento.

MOTORI A INDUZIONE

A CORRENTE ALTERNATA SEMPLICE.

Nella considerazione dei motori a campo magnetico alternativo, noi possiamo ancora prendere a considerare il caso in cui la spirale di armatura sia chiusa su se stessa esattamente come quella dei motori a campo Ferraris.

Per la trattazione di questa categoria di motori riportiamoci alla teoria elementare che abbiamo svolta nel capitolo riguardante i motori a campo Ferraris: ed osserviamo che il campo alternativo si può considerare come la risultante di due campi magnetici rotanti di cui l'uno d_B destro e l'altro s_B sinistro, nei quali l'induzione magnetica è costante ed uguale alla metà del valore massimo dell'induzione nel campo magnetico alternativo dato. Se dunque rappresentiamo con $2\ B$ l'induzione nel campo alternativo: questo equivale al campo risultante di due campi magnetici rotanti, l'uno destro e l'altro sinistro, di frequenza n e induzione magnetica B.

Similmente il complesso delle correnti indotte nelle spirali elementari di armatura equivalgono ad un magnete il cui momento magnetico è un vettore alternativo, equivalente a sua volta a due magneti rotanti, l'uno destro e l'altro sinistro, rispettivamente di momento magnetico d_A e s_A. La coppia che si ha da considerare nell'apparecchio è dunque la risultante delle coppie che si hanno rispettivamente per le azioni di d_B e s_B su d_A e s_A. Ed essendo nulli i momenti delle coppie risultanti dalle combinazioni di vettori rotanti in senso opposti, non si avranno conseguentemente che a considerare le coppie risultanti dalle combinazioni dei vettori d_B, d_A e s_B, s_A. La prima coppia è diretta verso destra e la seconda verso sinistra.

È facile vedere che per tutte le velocità compatibili con un funzionamento stabile il motore a induzione a campo magnetico alternativo, ove l'induzione ha il valore massimo $2\ B$, si comporta approssimativamente come il motore a campo magnetico rotante, ove l'induzione avesse il valore massimo B; solamente la coppia motrice è in esso alcun poco più piccola e si annulla per un valore della velocità di rotazione m alcun poco inferiore alla frequenza n. Le due linee corrispondenti alle due specie di motori si scostano invece notevolmente l'una dall'altra nelle parti corrispondenti alle velocità minori; e la differenza caratteristica che da ciò deriva è che per $m = o$ il momento della coppia motrice, che nel motore a campo Ferraris può avere un valore anche notevole, è nullo nel motore monofase.

Un motore a campo alternativo a induzione si presenta come un *motore a campo magnetico rotante differenziale:* per cui, come abbiamo visto, le sue proprietà si derivano direttamente da quelle dei motori a campo Ferraris.

Il motore a induzione monofase è stato per il primo studiato e costruito dall'Ing. Charles Brown, il quale provvide all'avviamento del motore facendolo funzionare come un ordinario motore a campo Ferraris. Precisamente il Brown, oltre alla serie di spirali destinate ad essere percorse dalla corrente alternativa di alimentazione, applica un'altra serie di spirali alla distanza angolare corrispondente ad un quarto di passo: nel caso di un motore bipolare, alla distanza angolare di 90°. E per ottenere le due correnti spostate di fase l'una rispetto all'altra di 90° destinate alla generazione del campo Ferraris durante il periodo di avviamento, il Brown suddivide, per mezzzo di opportuno commutatore, la corrente in due correnti derivate, di cui l'una percorrente la prima serie e l'altra la seconda serie di spirali: essendo nei due circuiti delle due correnti inserita una grande resistenza induttiva nell'uno, ed un condensatore elettrolitico (capacità di polarizzazione) nell'altro. Col ritardo di fase nel primo circuito ed un opportuno anticipo di fase nel secondo circuito, si può così facilmente ottenere il voluto spostamento di fase fra le due correnti destinate a generare i due campi magnetici alternativi componenti.

Un altro modo di provvedere all'avviamento del motore monofase a induzione consiste nel convertire il motore in uno del tipo a collettore: nel qual caso il rotore porta un avvolgimento ad anello od a tamburo con un collettore, quale un ordinario indotto Pacinotti (Motori Walker e Ganz).

Durante l'avviamento due spazzole si appoggiano sul collettore e la medesima corrente attraversa tanto lo statore quanto il rotore, funzionando così il motore con eccitazione in serie. Raggiunta una certa velocità le due spazzole vengono levate a mano od

Digitized by Google

automaticamente mediante una disposizione a forza centrifuga: e la corrente vien fatta circolare nel solo induttore, con che il motore viene ad essere del tipo ad induzione.

SISTEMA «ARNÒ» DI AVVIAMENTO DEI MOTORI MONOFASI A INDUZIONE.

Più semplicemente, allorquando l'avviamento del motore si faccia a vuoto, si può ricorrere al metodo da me proposto fin dal 1897 ed applicato a suo tempo su vasta scala anche per motori di grande potenza.

Ho dimostrato che per un valore critico della resistenza r degli avvolgimenti elementari dell'armatura — valore che è funzione dell'induttanza L degli avvolgimenti stessi e della frequenza n della corrente — la curva i punti della quale hanno per ascisse i valori della velocità di rotazione m dell'armatura e per ordinate i valori del momento K della coppia motrice, riceve all'origine una inclinazione tale che in corrispondenza di valori molto piccoli di m — quali quelli che si possono ottenere mediante un leggero impulso alla parte mobile del motore — corrispondono dei valori di K già superiori al momento della coppia resistente dell'apparecchio a vuoto o sotto debole carico. E poichè l'inclinazione, rispetto all'asse delle ascisse della curva del motore all'origine, è nulla per $r = o$ e per $r = 2\pi\, n\, L$, ne consegue che il valore della *resistenza critica* è compreso fra O e $2\pi\, n\, L$: e precisamente si dimostra che deve essere

$$r = (\sqrt{2} - 1).2\pi\, n\, L = 0{,}414\,.\,2\pi\, n\, L = 2{,}6\, nL \quad (1).$$

MOTORI A RIPULSIONE

MOTORE A RIPULSIONE DI «ELIHU THOMSON».

Questo motore è basato sul principio delle ripulsioni di Elihu Thomson. Esso appartiene alla categoria dei motori monofasi a collettore, ma in pari tempo a quella dei motori a induzione, perchè la corrente principale percorre il solo induttore o statore, mentre l'armatura è percorsa da una corrente dovuta alle forze elettromotrici indotte, le spazzole essendo chiuse in corto circuito. Si tratta dunque di una macchina con rotore, o indotto, munito di collettore a spazzole, lo statore o induttore della quale può essere, come in una dinamo ordinaria, munito di sporgenze polari, ovvero senza poli separati, come in un motore a induzione: in ogni caso il ferro deve sempre essere laminato. Il circuito del rotore in tale macchina non riceve corrente direttamente, ma è chiuso su sè stesso, mediante una piccola resistenza che riunisce tra loro le spazzole, che sono spostate rispetto al piano di commutazione di circa un quarto del semipasso. L'avvolgimento dello statore è destinato a ricevere una corrente alternata.

Supposto per semplicità il motore bipolare (figura 8), la direzione del flusso induttore è $A\,B$; e le spazzole sono applicate in c, d. In tutte le spire dell'indotto a destra della linea $A\,B$ si generano forze elettromotrici della medesima fase mentre nelle spire a sinistra di $A\,B$ si generano forze elettromotrici di fase opposta alla precedente. Se si considerano le spire comprese fra le spazzole nel mezzo anello $c\,a\,m\,d$, si vede che il gruppo $a\,c$ genera forza elettromotrice contraria a quella del gruppo compreso nell'arco $a\,c' = a\,c'$, la forza elettromotrice risultante sarà quindi quella dovuta soltanto alle spire da $c'\,a\,d$.

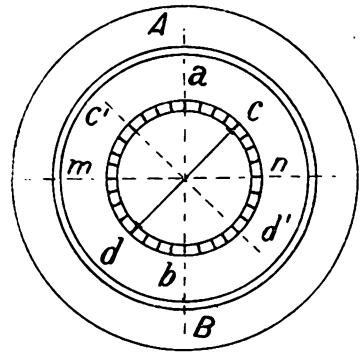


Fig. 8.

Similmente nell'altro mezzo anello il gruppo attivo risulta quello compreso fra c e d'. Ora siccome la corrente prodotta da queste forze elettromotrici si chiude attraverso il conduttore che unisce le spazzole, e genera un campo magnetico trasversale secondo la linea $c\,d$, ne risulta che in c e d si formano dei poli i quali saranno respinti dai poli più prossimi in A e B dello statore. Così che si sviluppa una coppia che fa rotare l'indotto da a verso c. Sotto l'azione di questa coppia il motore si avvia spontaneamente. Le spire del rotore funzionano come il secondario di un trasformatore e danno luogo ad una forza elettromotrice indotta dal flusso alternato (forza elettromotrice statica). Quando il motore è avviato, il rotore funziona anche come l'indotto di una ordinaria macchina dinamo-elettrica: e per effetto della rotazione si sviluppa un'altra forza elettromotrice (forza elettromotrice dinamica), la quale si compone con la precedente: e la corrente risultante si chiude attraverso il circuito che collega le spazzole.

MOTORE A RIPULSIONE «DÉRI»

In questo motore, a differenza di quello a ripulsione originario, il rotore porta due coppie di spazzole, una fissa nella direzione dello statore, l'altra mobile.

Ognuna delle spazzole fisse è cortocircuitata con una delle spazzole mobili: e la coppia di spazzole mobili può ruotare di 180°, supposto il caso del motore bipolare, sussistendo sempre i due circuiti accennati.

Si può facilmente vedere che il motore Déri funziona come un motore a ripulsione con due campi alternativi in quadratura: ed in esso l'effetto del movimento di una coppia di spazzole è quello di modificare il rapporto fra le intensità dei due campi magnetici componenti.

(1) Prof. R. Arnò: *Théorie élémentaire pour le démarrage des moteurs électriques asynchrones à courant alternatif simple* - Société Française des Electriciens (dicembre 1897).

Digitized by Google

I motori Déri furono per opera della Casa Brown-Boveri più largamente diffusi nella pratica: ed essi godono effettivamente di parecchie proprietà vantaggiose, essenzialmente per la loro potenza che può essere considerevole e la facilità della regolazione e della inversione, da farli preferire in alcuni casi ai motori asincroni a induzione, anche dove si dispone di una rete trifase di distribuzione.

In tali casi, per non caricare dissimmetricamente i vari circuiti di fase, la Ditta Brown-Boveri adottò il ripiego di costruire una macchina doppia, con due statori gemelli e due rotori uguali, montati sul medesimo asse. Gli avvolgimenti primari posseggono allora due numeri di spire diversi, nel rapporto di 1 e $\frac{\sqrt{3}}{2}$, e vengono fra loro raggruppati come i primari di due trasformatori monofasi secondo il sistema di Scott, i tre capi liberi vengono così collegati ai tre conduttori del sistema trifase. I due rotori hanno naturalmente due collettori distinti, e due sistemi di spazzole, in ognuno dei quali una coppia resta fissa, e l'altra viene spostata solidariamente con quella della macchina gemella.

MOTORE IN SERIE
COMPENSATO « LATOUR ».

Il motore in serie Latour si presenta come un ordinaio motore in serie puro e semplice, al quale vengano aggiunte due spazzole nella direzione del flusso dello statore e chiuse in corto circuito. In tale motore tende a formarsi un campo magnetico ellittico che si avvicina ad un campo rotante perfetto nelle condizioni di sincronismo. A questa velocità l'induttanza dell'armatura resta compensata, non essendovi più spostamento relativo dei conduttori dell'armatura rispetto al campo: ed il motore funziona quindi con un fattore di potenza molto elevato, prossimo all'unità. Per questo fatto il motore Latour si dice *motore in serie compensato*, quantunque la denominazione sia alquanto impropria perchè i caratteri del motore in serie sono in tal motore in parte scomparsi, mentre appariscono tutti quelli del motore a ripulsione.

Per il fatto che, come si è detto, nel motore Latour tende a formarsi un campo rotante, così il motore si costruisce con statore senza poli sporgenti.

APPENDICE

METODO « ARNÒ »
PER LA DIMOSTRAZIONE COL TUBO DI BRAUN DEL FUNZIONAMENTO DEI MOTORI ELETTRICI.

In due Comunicazioni fatte alla Associazione Elettrotecnica Italiana, ho presentato alcune esperienze col tubo di Braun sulla composizione dei vettori rotanti ed alternativi; ed ho dimostrato che col medesimo tubo si può rendere evidente anche il funzionamento di vari tipi di motori elettrici (1).

Come a tutti è noto, il momento di rotazione di un motore è dato dal prodotto del flusso di armatura per quello del campo nel seno dell'angolo compreso ($K = A\,B$ sen α).

Nella rappresentanzione che si ottiene sullo schermo del tubo, si astrae dal flusso del campo, e si mostra semplicemente il flusso di armatura, per rendere più chiaro il fenomeno. Infatti il fascio di raggi catodici devia sotto la risultante dei campi magnetici che sopra vi agiscono, e quindi, se si applicassero entrambi i campi, non si percepirebbe più distintamente la funzione delle due parti della macchina.

Rammentiamo che per effetto della persistenza delle immagini nel nostro occhio, quando la frequenza del fenomeno supera la decina di periodi al secondo, un vettore rotante appare sullo schermo come un circolo, uno alternativo come una retta. Un campo costante è invece rappresentato semplicemente da un punto, spostato rispetto alla posizione di riposo.

In base alla formola $K = A\,B$ sen α, che rappresenta il momento della coppia di rotazione dell'armatura, si possono analizzare i varii casi che danno luogo ad un motore, attribuendo ad A e B diversa natura.

(1) Esperienze col tubo di Braun sulla composizione dei vettori rotanti ed alternativi. - Prof. R. Arnò. *L'Elettrotecnica;* 15 Giugno 1922). Il funzionamento dei motori elettrici dimostrato col tubo di Braun. - Prof. R. Arnò. *L'Elettrotecnica;* 15 Maggio 1925).

Digitized by Google

Digitized by Google

ING. PROF. GIUSEPPE SARTORI

R. SCUOLA DI INGEGNERIA - BOLOGNA

I GRANDI TRASPORTI DI ENERGIA

Digitized by Google

Digitized by Google

Premesse.

Si vorrebbe far risalire a Volta la prima idea di una trasmissione di energia elettrica ricordando quanto egli scriveva in data 18 Aprile 1777 (pag. 194 del Terzo Volume delle Opere di Alessandro Volta) al Padre Barletti:

« Quante belle idee di esperienze sorprendenti mi « van ribollendo in testa eseguibili con questo stra- « tagemma di mandare la scintilla elettrica a fare « lo sbaro della pistola a qualsivoglia distanza e in « qualsivoglia direzione e positura! Invece del co- « lombino che va ad appiccare l'incendio alle mac- « chine di fuochi artificiali, io vi manderò da qualun- « que sito, anche non diretto, la scintilla elettrica, « che col mezzo della pistola aggiustata al sito della « pianta artificiale vi metterà fuoco. Sentite. Io non « so a quanti migli un fil di ferro tirato sul suolo dei « campi e delle strade, che infine si ripiegasse in- « dietro o incontrasse un canale d'acqua di ritorno, « condurrebbe giusta il sentier segnato la scintilla « commovente! Ma preveggo, che in un lunghissimo « viaggio dei tratti di terra molto bagnata, o delle « acque correnti, stabilirebbero una comunicazione « e quivi devierebbe il corso del fuoco elettrico spic- « cato dall'uncino della caraffa per ricondursi al « fondo. Ma se il fil di ferro fosse sostenuto alto da « terra da pali di legno qua e là piantati es. gr. da « Como fino a Milano; e quivi interrotto solamente « dalla mia pistola, continuasse e venisse infine a « pescare nel canale del Naviglio, continuo col mio « Lago di Como; non credo impossibile di far lo « sbaro della pistola a Milano con una boccia di Ley- « den da me scaricata a Como ».

Ma il concetto di energia di cui ai tempi di Volta, tra il finire del 17° e l'inizio del 18° secolo, non si aveva che una idea molto imprecisa, ha cominciato a penetrare nel campo scientifico proprio quando il Sommo era presso a morire. Fra il 1824 ed il 1830 (il Volta è morto nel 1827) Sadi Carnot, che — si può asserire — non ebbe precursore alcuno, nelle sue *Réfléxions sur la puissance motrice du feu* enunciò per primo dei principi di carattere energetico con le sue considerazioni sulla potenza motrice del calore, quando le macchine termiche erano ancora poco diffuse e nessuno aveva pensato a darne una teoria. Fu egli per primo che intravide la impossibilità del moto perpetuo; così che quando nel 1842 il medico Roberto Mayer enunciò il grande principio della *conservazione dell'energia* non fu difficile associare le idee sue a quelle di Carnot.

Pochi compresero allora la profondità di quel grande enunciato e non fu che per l'opera di Helmholtz, di Clausius e di Lord Kelvin, i quali si sforzarono di far rientrare il principio in qualsiasi manifestazione di carattere meccanico, che esso, diffondendosi sempre più, finì grado grado col divenire un articolo di fede scientifica cui si appoggiò tutto il meraviglioso movimento che portò la fisica e la chimica a impensato splendore.

Col perfezionarsi e diffondersi della macchina a vapore nacque l'industria, facilitata nei trasporti dei suoi prodotti dalla locomotiva, che ebbe come ausilio potente il telegrafo per tutte le operazioni di indole commerciale. Fu così che cominciò, verso la metà del secolo scorso, a porsi il problema della *trasmissione di forza* (ancora non si parlava allora di trasmissione di energia meccanica) entro raggi limitatissimi e che ebbe soluzioni eleganti, come quella telodinamica di Sciaffusa che fino alla fine del secolo costituì un esempio tipico e — nel suo genere — mai superato.

Ma di vera e propria *trasmissione di energia*, senza specificazione di forma si cominciò a parlare dopo un decennio della invenzione della dinamo che permise di trasformare in energia elettrica ed in modo altamente economico l'energia meccanica.

« Non appena si cominciarono a trasmettere cor- « renti di grande intensità — dice Galileo Ferraris « in un memorabile discorso (1) — prodotte per mezzo « di macchine d'induzione con la spesa di lavoro mec- « canico, e con quelle si cominciarono ad attivare « lampade elettriche, a fondere metalli, a comandare « motori, l'attenzione dovette rivolgersi natural- « mente, come alla cosa più importante alla consi- « derazione del lavoro. E siccome con una medesima « corrente in un unico circuito, od in una rete di « circuiti, si poteva produrre a piacimento lavoro « meccanico, o lavoro chimico, o calore, o luce, « nelle condizioni più svariate ed in regioni comunque « lontane dal luogo dove il lavoro era speso, così il « fatto non solamente costituì la più evidente riprova « del grande principio della conservazione dell'ener- « gia, ma naturalmente dovette forzare nel pensiero

(1) Galileo Ferraris: *Sulla trasmissione elettrica dell'energia*. Lettura fatta nella solenne adunanza del 3 Giugno 1894 alla R. Accademia dei Lincei.

Digitized by Google

« il concetto dell'energia che passa da luogo a luogo, « che si muove, che si trasmette. Col concetto nacque « la corrispondente locuzione: *trasmissione dell'e-* « *nergia*. Concetto e locuzione si assodarono e di- « vennero popolari nella tecnologia, prima che su « di esse si fermasse di proposito la speculazione « scientifica ».

La prima esperienza di una trasmissione di energia meccanica, passando attraverso alla forma elettrica dell'energia, risale al 1873 alla Esposizione Universale di Vienna; e non fu voluta, ma causale per avere un operaio, per sbaglio, immessa della corrente elettrica in una dinamo che si mise tosto a girare come motore. Nè si seppe subito mettere a partito il fortuito e interessantissimo risultato, tanto che « ancora nel 1881 a molti sembravano parados- « sali (è ancora G. Ferraris che parla) (1) le idee che « Marcel Deprez esponeva nel Congresso elettrico « di Parigi intorno alla possibilità di trasmettere il « lavoro meccanico economicamente alla distanza di « qualche chilometro. Quelli erano i tempi antichi, « leggendari della Elettrotecnica; la storia della « trasmissione elettrica dell'energia, intesa come tale, « comincia solo da quei tempi ».

Ed ora? Ora, proprio per virtù del trasporto dell'energia a grandi distanze che solo può compiersi con la forma elettrica, forma di transizione, perchè dalla forma meccanica della energia si sbocca sempre ancora alla forma meccanica, o alla chimica o alla termica, una nuova forma di civiltà si è andata gradatamente sviluppando e formando, dovuta alla possibilità di sviluppare ovunque un'industria o mettere a partito ricchezze naturali, o impiegare l'abbondanza di mano d'opera, o soddisfare infine ai mille bisogni e tuttora crescenti a cui l'uomo, nel nuovo fortunato benessere, non può assolutamente più rinunciare.

Così l'energia elettrica, con le sue preziose attitudini, si presenta come uno dei fattori più importanti del progresso umano, senza contare che il lavoro scientifico intorno all'atomo elettrico ha concesso di spingere molto profondo lo sguardo entro il formidabile problema della costituzione della materia, rinnovando per tal modo tutta la fisica e tutta la chimica. Non per nulla l'energia elettrica occupa nella scala gerarchica delle forme di energia il posto più eminente.

L'energia è la base della nostra attuale organizzazione; anzi si suole prendere il consumo medio di energia per abitante come indice del grado di civiltà di un popolo. Si potrà discutere sopra questo criterio essendo ancora da dimostrare che la civiltà progredisce in ragione diretta dello sviluppo industriale e commerciale di una nazione, questo sviluppo potendo essere enormemente facilitato da eccezionali condizioni di ambiente e da ricchezze del suolo, mentre la civiltà di un popolo può appoggiarsi a titoli di nobiltà che la storia più che millenaria gli conferisce e ad aspirazioni ideali, in netto contrasto con quei gretti utilitarismi così frequenti nei paesi dove si vive la febbre del rapido guadagno.

Comunque è indubitato che i progressi in ogni campo dello scibile si sono rapidissimamente intensificati non appena fu reso possibile di rendere tutti partecipi dell'uso della energia, distribuita sotto una forma che si presta meravigliosamente ad ogni bisogno. Produrre questa energia nel modo più economico, diffonderla quanto più è possibile, distribuirla nella misura che ognuno richiede, nel luogo e nel momento voluto, assicurarne la fornitura in ogni tempo nelle condizioni più opportune, è lo scopo di quella branca della Tecnica che va sotto il nome di *Trasporto e distribuzione della energia*. E quale sia stato il successo in un trentennio appena di questa Tecnica lo dicono le innumerevoli centrali idrauliche e termiche che furono erette e che incessantemente si erigono, le centinaia di migliaia di chilometri di linee che trasportano anche a distanza di centinaia di chilometri l'energia prodotta sotto forma elettrica, le inerenti sottostazioni di trasformazione e quell'immenso reticolato di condutture che la convogliano fino ai punti di consumo.

Ma — fatto enormemente significativo e che non ha riscontro in nessun altro ramo della Tecnica — queste centrali, queste linee di trasporto, queste sottostazioni, queste ultime ramificazioni di condutture, non costituiscono, prese a sè, un congegno mirabile disgiunto dal congegno analogo più prossimo. Fin dove è tecnicamente possibile la interconnessione dei vari congegni regna sovrana, come se tanti alberi di trasmissione meccanica fossero tra loro collegati a mezzo di appropriati ingranaggi. Così decine di centrali modeste o imponenti hanno le loro macchine funzionanti all'identico passo come tanti pendoli oscillanti in sincronismo perfetto. È un complesso organismo dove tanti cuori pulsanti in cadenza immettono la benefica energia. E dalle infinite ramificazioni ognuno spilla, quando vuole, la linfa vitale nella misura che gli abbisogna: un filo o un rigagnolo o un fiume.

L'energia elettrica fluisce all'esterno dei conduttori.

È come avviene che l'energia dell'acqua che muove la ruota idraulica o quella espansiva del vapore che muove lo stantuffo o il rotore di un turbo, si ritrova sotto forma elettrica per virtù della dinamo che a quel movimento obbedisce? Questo è spiegato in altra parte di questo volume. Qui basta ricordare che vi è contiguità nel processo di trasporto della energia, perchè proprio là dove il moto tenderebbe ad esaurirsi, se di continuo non arrivasse dal fluido motore nuovo alimento, sorge in forma nuova la stessa energia, detratta quella che per le inevitabili dissipazioni, si tramuta in calore. Attraverso quello spazio d'aria (e identicamente avverrebbe se vi fosse il vuoto) che divide la parte fissa dalla parte mobile della dinamo ed entro cui essa ruota, procede quella energia con un processo che non è in fondo difficile a intendersi per chi è in possesso dei principi che regolano il funzionamento di una dinamo, a corrente continua, o alternata che sia.

Al di là della dinamo si stende una conduttura: due fili assicurati ad isolatori fissati su pali traversano la campagna, corrono per chilometri e chilo-

(1) Discorso citato.

Digitized by Google

metri. Poi entrano in una officina ; la corrente che in essi fluisce viene immessa in una nuova dinamo che funzionando in modo inverso alla precedente restituisce l'energia nuovamente in forma meccanica. Come si è trasferita l'energia elettrica dal punto di partenza al punto d'arrivo ? Questo è quanto qui dobbiamo chiarire facendo appello a nozioni che sono abbastanza diffuse anche tra chi non coltiva in modo esclusivo, preponderante, questo ramo della scienza.

Si può a primo tratto pensare che l'energia fluisca all'interno del filo dove fluisce la corrente elettrica. Sappiamo però che la corrente che procede in un senso in un filo è la stessa di quella che fluisce nel filo di ritorno e ciò ci rende già dubbiosi della ipotesi. Ma sappiamo ancora che a parità di intensità di corrente tanto più grande è l'energia trasmessa per unità di tempo quanto più elevata è la tensione o la differenza di potenziale impressa all'origine. Vi è dunque un altro elemento essenziale che interviene e si dimostra che, in regime di corrente continua, l'energia trasmessa per unità di tempo o, più brevemente, la potenza, è proporzionale al prodotto di quelle due quantità. Se la differenza di potenziale si misura in *volt* e l'intensità in *ampère*, il prodotto dà senz'altro in *watt* la potenza accennata.

Orbene. Dopo che Faraday ebbe per primo la visione netta di un campo di forza in tutto lo spazio che circonda un conduttore percorso da una corrente, ripugnandogli l'idea che le azioni magnetiche di una corrente si rendessero palesi a distanza senza l'intervento del mezzo interposto, si cominciò a intravedere la possibilità che nel mezzo nascessero, sotto determinate cause, delle speciali reazioni a produrre le quali occorreva spendere un lavoro, così come occorre un lavoro a stendere dei fili elastici. E analogamente al fatto del campo magnetico esterno ad un conduttore percorso da corrente, si considerò il campo di forza elettrico all'esterno di un conduttore elettrizzato, al quale campo verrebbe a corrispondere un diverso stato di reazione del mezzo, a produrre il quale occorre pure spendere un lavoro.

Allora quando fra due fili esiste una differenza di potenziale, in ogni unità di volume in cui possiamo suddividere idealmente lo spazio circostante, risulta localizzata — seguendo questo concetto — una quantità di energia che è tanto maggiore quanto più grande è la differenza di potenziale. Che se poi in quei due fili circola una corrente, nella accennata unità di volume deve risultare localizzata anche una seconda forma di lavoro reattivo, quello che corrisponde al campo magnetico entro al volume stesso. Se ne può concludere che il lavoro localizzato in quel volume unitario è la somma dei due.

Giunti a questo punto ci possiamo domandare se quel lavoro, quell'energia, così raccolta entro il volume unitario considerato, rimanga stazionaria nello spazio mentre la corrente fluisce nel filo ; oppure se non possa soddisfare meglio i principi cardinali della filosofia naturale l'idea o l'ipotesi che quel lavoro si trasporti innanzi con la corrente, rimanendo pure immutato in quantità nel volume considerato, perchè il quantitativo che ne esce è di continuo rinnovato da un egual quantitativo che arriva dal volume unitario ad esso immediatamente aderente.

La prima visione del fenomeno non ci consente di spiegare il processo di contiguità nella trasmissione di energia ; lo consente invece la seconda visione, quella seconda cui l'energia è in certo qual modo spinta innanzi da quella che di continuo si rende disponibile all'origine ; e giunta che sia al termine del circuito dove esiste il motore, trova ancora modo di procedere innanzi, cambiando forma, comparendo meccanicamente nell'albero del motore che anima lo stabilimento.

Ma se così stanno le cose (e Poynting lo dimostrò prendendo le mosse dalle equazioni di Maxwell) l'energia che di continuo viene trasmessa non è nel filo, bensì nello spazio circostante al filo. E se si trattasse di un cavo l'energia resterebbe localizzata nel dielettrico (isolante) che lo circonda e quivi si propagherebbe nel modo dianzi spiegato.

E a che serve il filo allora ? Il filo serve soltanto a dare una direzione alla propagazione della energia, è una guida e che non fa neppure gratuitamente questo ufficio perchè sempre si riscalda.

E, precisamente, occorre lievemente correggere la conclusione cui siamo dianzi arrivati, perchè ogni volume unitario di spazio circostante al conduttore cede al suo aderente nella direzione del filo una quantità di pochissimo inferiore a quella che penetra dalla sua faccia anteriore, la differenza dirigendosi perpendicolarmente verso il filo e quivi penetrando lo riscalda. Ecco il fenomeno Joule.

La somma complessiva dei contributi energetici che ogni unità di volume dirige verso il filo corrisponde alla quantità di energia che appare sotto forma termica nel filo o nei fili per la lunghezza corrispondente alla lunghezza del volume unitario misurata nella direzione in cui l'energia si propaga.

Ecco perchè l'energia che arriva è – prescindendo da altro fenomeno di cui si discorrerà più innanzi — attenuata, rispetto a quella contemporaneamente partita all'origine del circuito, di quel tanto che, per effetto della resistenza elettrica del filo, va dissipata sotto forma di calore. Dalla importanza di questa dissipazione rispetto all'energia che viene trasmessa dipende il *rendimento industriale della trasmissione.*

Trasporto dell'energia con correnti alternative.

E fin qui il fenomeno per la corrente continua o, come anche si dice, unidirezionale.

E se la corrente fosse alternata ?

Notiamo che se invertendo la differenza di potenziale noi invertissimo anche il senso della corrente, verremmo bensì ad invertire il senso di quelle reazioni del mezzo ambiente rispettivamente dovute alla presenza del campo elettrico e del campo magnetico. Ma nulla verrebbe a modificarsi quanto al senso della propagazione dell'energia, che rimane immutato, sempre dal congegno ove si svolge la produzione della energia elettrica verso quello dove la detta energia viene utilizzata comparendo allora sotto altra forma.

Digitized by Google

Se pertanto la inversione della differenza di potenziale è periodica, originando così quella che si chiama la corrente alternata, nessuna restrizione dobbiamo fare al discorso precedente, almeno fino a tanto che il fenomeno della inversione risulta sufficientemente lento da poter considerare *in un determinato istante* la corrente di intensità eguale in tutti i punti del circuito. Poichè ogni perturbazione di uno stato elettro-magnetico di un circuito si propaga lungo un filo isolato, teso entro l'aria, con una velocità che si avvicina a quella della luce, soddisfano alla condizione precedente anche le correnti che si invertono 100 volte al secondo (frequenza = 50 periodi) e percorrono circuiti anche superiori al centinaio di chilometri di lunghezza.

Noi per semplicità non ci occuperemo di altri casi più complessi. Solo procureremo più avanti di mostrare come non sempre la corrente alternata raggiunge i suoi valori nulli e massimi nell'istante medesimo in cui si verificano gli analoghi valori della tensione. Il fenomeno della corrente può seguire con un certo *ritardo* quello della diff. di pot.; talvolta può anche esservi *anticipo*. Si tratta di due fenomeni armonici di eguale periodo che possono risultare o in fase o in differenza di fase.

Un po' di storia.

È curioso che la corrente alternata che fu la prima ad essere utilizzata prodotta con macchine utilizzanti il principio della induzione elettromagnetica scoperto da Faraday, sia stata all'inizio delle vere applicazioni elettriche quasi soppiantata dalla corrente continua non appena si affermò nell'industria la grande idea del Pacinotti. E ciò non è difficile a comprendersi quando si pensi che le prime macchine per corrente alternata erano magneto elettriche, utilizzavano cioè magneti permanenti per creare il campo, donde ingombro enorme ed impossibilità di regolazione. Pensando poi al fatto che sino a dopo la metà del 18° secolo tutte le applicazioni della corrente elettrica erano impostate sull'uso della corrente continua si comprende come la dinamo-elettrica scoperta da Pacinotti abbia nettamente e rapidamente orientato tutti i tecnici d'allora verso la dinamo a corrente continua non appena il francese Gramme, che era venuto a conoscenza perfetta delle idee di Pacinotti ed aveva saputo darvi forma industriale, mise sul mercato delle macchine che rispondevano discretamente ai modestissimi bisogni d'allora.

Si comprese però subito, dopo la scoperta della riversibilità del funzionamento della dinamo elettrica e dopo le prime applicazioni della energia elettrica alla illuminazione, che per trasmettere potenze elettriche rilevanti senza ricorrere a sezioni di conduttori esagerate occorreva spingere a valori sempre più alti le tensioni contenendo invece le intensità entro limiti ragionevoli.

Fu così che la corrente continua si vide un po' contrastato il passo perchè generatrici e motori che la producono o la utilizzano richiedono un organo speciale (il collettore) sempre di funzionamento delicato non appena la tensione raggiunge e sorpassa il migliaio di volt. Mentre, perfezionati subito gli alternatori, non più a magneti permanenti ma con campi magnetici prodotti con elettrocalamite attivate da corrente continua prodotta da una piccola dinamo a corrente continua (eccitatrice), si comprese subito che con queste macchine la produzione dell'alta tensione risultava enormemente facilitata per l'assenza di qualsiasi collettore.

Non bastava però, perchè a rendere praticamente vantaggiosa tale possibilità occorreva un mezzo facile ed economico per tradurre l'energia in arrivo a tensione conveniente per le applicazioni cui essa ormai si dimostrava suscettiva: illuminazione, riscaldamento, piccola e grande forza motrice, elettrometallurgia, ecc.

Si risolse il problema, in principio, facendo muovere con l'energia in arrivo un motore ad alta tensione, il quale a sua volta moveva una dinamo a bassa tensione per avere energia atta alla distribuzione; nè per la corrente continua si seppe fino ad ora trovare di meglio. Ma per la corrente alternata, la scoperta del trasformatore statico e del motore a campo rotante furono decisivi per il successo della trasmissione dell'energia prima a grandi e poi a grandissime distanze, in misura moderata in principio, in quantità ingentissime, poi, mano mano che si andarono, con innumerevoli perfezionamenti nelle tecniche sussidiarie, eliminando i pericoli, gli inconvenienti e i disturbi che da principio sembrava dovessero arrestare lo sviluppo di questa industria che ha ormai raggiunto una importanza grandiosa.

Veramente la invenzione del trasformatore statico che figurò per la prima volta come apparecchio industriale alla Esposizione Internazionale di Elettricità di Torino del 1884 presentato dalla *National Company for the distribution of Electricity by secondary generators* più che una invenzione era una ingegnosissima modificazione dell'antico rocchetto di Ruhmkorff studiata dal francese Lucien Gaulard. Ma la Giuria, nell'assegnare all'espositore un premio di Lire 10.000 a titolo di incoraggiamento « acciocchè prosegua a perfezionare il suo sistema « molto acconcio per distribuire sopra regioni estese « l'illuminazione elettrica di qualunque forma » e nell'assegnare al Signor Gaulard la medaglia d'oro di collaborazione, rilevava che « quantunque il « problema di trasformare per mezzo della induzione « correnti deboli in correnti più forti non sia nuovo, « pure riconosceva che l'ultima forma data dal Sig. « Gaulard agli apparecchi di induzione era molto « razionale e rendeva possibile siffatta trasformazione « con lieve perdita di energia ».

Ma di quella Giuria costituita da eminenti personalità italiane ed estere faceva parte il Galileo Ferraris che assogettò quell'apparecchio a numerose ed accuratissime esperienze, ricercando metodi completamente nuovi per le misure di correnti alternate, mettendo in luce per primo la grande influenza che sulla potenza di una corrente alternata ha la fase della intensità rispetto a quella della differenza di potenziale, la necessità di ricorrere per il nucleo a circuiti magnetici quanto più è possibile chiusi, la

Digitized by Google

opportunità di collegare generatori secondari ed apparecchi di utilizzazione in parallelo per conseguire la migliore regolazione quando si effettui la alimentazione del primario a tensione costante. E in una Memoria che rimase classica e che per l'epoca fu una vera rivelazione, presentò alla R. Accademia delle Scienze di Torino l'11 Gennaio 1885 il riassunto delle sue esperienze e dei suoi studi tracciando da grande maestro la vera *teoria del trasformatore statico a correnti alternate*.

Qual meraviglia se dopo quella teoria così magistralmente esposta la Casa Ganz di Budapest abbia fatto brevettare i suoi trasformatori Zipernowsky, Déri, Bláthy che uscirono dalle sue officine praticamente perfetti ?

Questo accenno all'opera di Galileo Ferraris sul trasformatore statico era particolarmente qui doverosa perchè questo apparecchio è oggi la chiave di volta dei grandi trasporti di energia. Chiave di volta, ripetiamo, perchè a nulla sarebbe valso che la tecnica degli isolamenti delle linee e dei cavi avesse continuato a progredire, incalzata dalla necessità di elevare sempre più le tensioni per effettuare in condizioni economiche ingenti trasporti di energia, se il trasformatore statico, non avesse prestato ausilio potente all'alternatore, anch'esso soggetto a un limite (si arrivò fino a 30.000 volt) nella possibilità di fornire elevate tensioni. Invece oggi non si superano di regola i 10 ÷ 12.000 volt per la tensione degli alternatori nelle centrali, assegnando al trasformatore il compito di portare la tensione agli altissimi limiti di 220 ÷ 250.000 volt quali ormai si richiedono, per riabbassarla poi all'arrivo a tensioni intermedie per la distribuzione entro le zone industriali, salvo consentire ulteriori abbassamenti per raggiungere le tensioni occorrenti agli apparecchi situati presso gli utenti.

Il campo Ferraris.

Ma non è solo per questo potente contributo di speculazione scientifica e di rigorosa e profonda indagine sperimentale nei riguardi del trasformatore statico che l'opera di Galileo Ferraris è da tutti riconosciuta eminente nel vasto campo della trasmissione dell'energia. È sua, esclusivamente sua quella grandiosa scoperta del campo rotante che dal suo nome ormai si intitola (*campo Ferraris*) presentata con liberalità sconfinata, perchè tutti ne attingessero un possibile utile, alla R. Accademia delle Scienze di Torino nella storica seduta del 18 Marzo 1888. Perchè se il motore asincrono, di semplicità ideale, atto a soddisfare ogni esigenza industriale, non fosse nato e soli fossero rimasti i motori sincroni, come sembrava dover essere anche dopo la grande Esposizione Universale del 1889 in Parigi, la forza motrice prodotta elettricamente non sarebbe divenuta così popolare, nè la trasmissione e distribuzione di energia avrebbe assunto proporzioni così gigantesche.

Vennero subito dopo i motori Tesla, i motori Dobrowolski a correnti polifasi e Galileo Ferraris potè assistere giustamente soddisfatto a quel celebre esperimento di Lauffen (1891) col trasporto di 300 cavalli fino a Francoforte a 173 kilometri di distanza ad una tensione di 15.000 volt.

Ormai non era più possibile dubitare della possibilità di trasportare anche a grandi distanze ingenti quantità di energia. Era soltanto questione di tempo per migliorare e perfezionare, portando nella tecnica delle alte tensioni le innovazioni occorrenti. Nessuno però alla fine del secolo scorso avrebbe potuto profetare ciò che avvenne in 25 anni di pertinace lavoro. Scienza e tecnica lavorando in meravigliosa simbiosi hanno prodotto miracoli. E fin dove si è arrivati, toccando rapidamente anche delle molte difficoltà superate, ci sforzeremo qui di esporre in modo sintetico.

Trasporti di energia con correnti continue.

Le cose or ora dette a proposito delle correnti alternative potrebbero lasciar credere che la corrente continua abbia dovuto cedere completamente il campo e che ormai ogni traccia sia scomparsa delle applicazioni sue al trasporto della energia. Ma così non è. Basterebbe pensare anzitutto all'impiego alla trazione elettrica per concluderne che non è certo insignificante la potenza elettrica sotto forma di corrente continua che si trasporta e si distribuisce per profittare delle caratteristiche e pregevoli qualità del motore a corrente continua ad eccitazione in serie (ed altrove in questo stesso volume illustrate). Noi in Italia abbiamo un esempio forse tipico di trazione a corrente continua ad alta tensione, quello della Torino-Valli di Lanzo a 4000 volt, ottenuti con due dinamo accoppiate elettricamente in serie, e stabiliti sulla linea di servizio, mentre i locomotori portano quattro motori montati in serie, della potenza totale di 410 kilowatt.

Ma se i trasporti veri e propri di energia a corrente continua ad alta tensione, come furono strenuamente propugnati dal Thury e dalla sua ditta (di Ginevra) anche costruiti, che intorno alla fine del secolo si diffusero alquanto con tensioni che si spinsero anche fino a 15 ÷ 20.000 volt, andarono gradatamente scomparendo per essere sostituiti con impianti a correnti alternative, alcuni rimasero a testimoniare della bontà di un sistema, da certi punti di vista oltremodo pregevole. E basta accennare per tutti a quello di Moutiers-Lyon dove la tensione si potè gradatamente innalzare fino a 100.000 volt (verso terra) col relativo cambio di isolatori in linea, e che serve al trasporto di molte migliaia di kilowatt, impianto che ha corrisposto sempre alle più severe esigenze. Anzi, profittando degli straordinari progressi fatti in materia di cavi, si sta posando adesso un cavo sotterraneo isolato per 150.000 volt, il quale consentirà anche (mettendo decisamente a terra il suo punto di mezzo) di elevare la tensione a 300.000 volt quando si vorrà aumentare ancora più la potenza da trasmettersi.

Una tensione così elevata (150.000 volt) se può essere stabilita sopra una conduttura appoggiata ad isolatori nell'aria o confinata entro un cavo di appropriata costruzione, non può certamente essere rac-

Digitized by Google

colta sul collettore di una sola macchina. Ne occorrono per esempio 32 in serie a 4800 volt di tensione cadauna, con 8 gruppi, per esempio, di 4 macchine allineate. A metà di ogni gruppo può trovar posto la motrice idraulica.

Tutta la centrale lavora a intensità costante (100 ampère) con che tutto il sistema di interruttori, istrumenti, apparecchi ausiliari assume una straordinaria semplicità e la graduazione della potenza trasmessa si effettua con la regolazione della tensione, facendo funzionare un numero più o meno grande di gruppi e registrando da un minimo ad un massimo quella di un gruppo.

All'estremità della linea occorre convertire la energia elettrica in energia meccanica a mezzo di motori parimenti disposti in serie affinchè lavorino con intensità costante, mentre per la modulazione del carico interviene la regolazione della tensione. Ove occorra produrre energia meccanica lungo la linea basta inserire sopra un filo un motore che lavorerà a corrente costante e tensione variabile.

La linea è costituita da due fili, isolati, ma uno potrebbe anche essere messo a terra. Anzi, disponendo di terre ottime alla partenza ed all'arrivo, si potrebbe eliminare il conduttore di ritorno. Oppure il conduttore di ritorno potrebbe seguire traccia diversa del filo di andata per traversare zone da servire di energia. L'energia meccanica prodotta dai motori può servire come tale per industrie. Però può muovere una dinamo a bassa tensione per la distribuzione per luce e piccola forza motrice.

Se pertanto da un lato il sistema a corrente continua e ad intensità costante presenta vantaggi cospicui di semplicità e grande economia per la linea, non sono di piccola entità gli inconvenienti, occorrendo accuratamente isolare tutte le macchine verso terra e non facile riuscendo la regolazione della tensione, mentre per i motori non è troppo agevole mantenere costante la velocità, condizione quasi sempre prescritta per quelli fissi negli stabilimenti.

L'isolamento della linea è assai più facile ed economico che non per le correnti alternate. Infatti gli isolatori devono corrispondere al più alto valore di tensione normalmente ricorrente in linea. Per una tensione alternativa di 100.000 volt efficaci occorre prevedere isolatori per il valore massimo istantaneo e che è (supponendo che l'andamento della curva di tensione sia semplicemente armonico) $1/\sqrt{2} \cdot 100000 = 142.000$ volt, mentre per la corrente continua bastano isolatori per 100.000 volt. Di qui una notevole economia. E poi mancano in un siffatto impianto quei disturbi propri a manovre interne o scatti di automatici che negli impianti a corrente alternativa determinano talvolta sopraelevazioni di tensione pericolose contro le quali occorre disporre adatte protezioni. È però anche vero che abbiamo pochi esempi di grandi trasmissioni di energia ad altissima tensione *a corrente costante* e tutti funzionano in modo indipendente; manca cioè la interconnessione di vari impianti tra loro che — possibile con la correntà alternativa dove si lavora a *tensione costante* — è consentita negli impianti a corrente costante soltanto fino al limite massimo di tensione a cui gli isolamenti scelti e adottati possono resistere.

Manca così a questi impianti uno dei requisiti che — in quest'ultimo decennio ed in Italia particolarmente — si è rilevato come indispensabile per la più razionale utilizzazione delle energie idrauliche di una regione ed eventualmente di quelle termiche dovute a combustibili da utilizzarsi in posto. Che se le speranze concepite nel *Transverter* e di cui fu parlato in questo volume potranno dimostrarsi bene fondate, potrà il campo del trasporto di energia a corrente continua ad alta tensione notevolmente allargarsi. Infatti potendo con quell'apparecchio produrre la tensione anche di 100.000 volt si potrà lavorare a tensione costante e corrente variabile; esso potrebbe così portare nel campo della corrente continua l'identica flessibilità della corrente alternata nei riguardi della interconnessione degli impianti di produzione di una vasta regione.

La superiorità della corrente alternativa.

Sotto questo profilo gli impianti a corrente alternativa, a malgrado della decisa preferenza dappertutto accordata alle macchine sincrone che obbligano il funzionamento ad eguale frequenza di tutte le centrali accoppiate in parallelo, presentano una superiorità indiscutibile. Ora è bene mettere nel dovuto risalto come in Italia, più che in qualsiasi altro paese, si sia immediatamente concepito come dalla possibilità di collegare a mezzo di linee, occorrendo anche di grande lunghezza, centrali idroelettriche di regioni i di cui corsi d'acqua presentano notevoli differenze di fase nei cicli con cui i periodi di magra si alternano con quelli di morbida, poteva derivare un complesso di utilità degne della massima considerazione. Per i compensi che in tal modo potevano scaturire fra i diversi regimi idrici dei corsi d'acqua; per la possibilità di spingere più oltre la potenza media ricavabile da un impianto, anzichè limitarla a quella corrispondente alle portate minime accertate; per la superfluità in cui venivano a cadere determinati impianti termoelettrici destinati soltanto ad integrare le deficenze di potenza nei periodi di magra di una determinata centrale o di poche centrali di una medesima regione raggruppate; per la sicurezza, incomparabilmente maggiore, nei riguardi della continuità del servizio in cui si sarebbero trovati tutti gli utenti per il fatto di essere serviti da fonti molteplici di energia e da diverse direzioni proveniente.

Adottando così il concetto della interconnessione degli impianti si venne rapidamente formando in Italia una grandiosa rete sulla quale in nodi determinati immettono le centrali l'energia elettrica e da altri nodi della quale la si spilla, la si deriva, per gli infiniti servizi cui essa deve soddisfare. Che se per non provocare ripercussioni troppo estese di un guasto, di un disturbo, di un inconveniente, che a malgrado di previdenze, precauzioni e protezioni svariate, pur qualche volta interviene a turbare il regolare andamento di qualche gruppo d'impianti, si delimita o si circoscrive la interconnessione, non è meno vero che tutto è predisposto perchè la delimitazione si possa agevolmente modificare con sezio-

Digitized by Google

namenti da un lato e collegamenti dall'altro; ond'è che piuttosto di una rete unica grandiosa, si può parlare di tante reti affiancate e talvolta sovrapponentesi, pronte a modificarsi nella struttura non appena il bisogno lo richieda, scambiandosi così anche il servizio di determinate zone.

Quello che avvenne in Italia, avvenne anche in altri paesi, segnatamente negli Stati Uniti d'America, non però con eguale sviluppo in proporzione del numero e della entità degli impianti. E neppure trovò sviluppo altrove quel mirabile concetto che per primo si rintraccia nella legislazione italiana (1919) di compiere la integrale utilizzazione di un bacino imbrifero, modulando quanto più è possibile le portate con la creazione di serbatoi di raccolta ogni qualvolta condizioni locali li consentono e ragioni economiche li consigliano; i quali poi, a loro volta, permettono di variare la potenza di una centrale a seconda dei bisogni nelle varie ore della giornata, o entrare in servizio soltanto per provvedere alle punte del carico o infine soccorrere, in epoche determinate, altri impianti dove per deficenza d'acqua l'energia scarseggia.

E poichè anche la presenza dei serbatoi artificiali è ben lungi dal consentire un compenso completo, perchè risulta sempre notevole il quantitativo d'acqua che sfugge inutilizzata al momento delle piene, così è pure sempre necessario ricorrere, per sopperire alle mancanze, ad impianti termoelettrici per i quali non vige più come un tempo l'idea di crearli in corrispondenza delle grandi agglomerazioni industriali, ma piuttosto là dove più facile può risultare l'approvvigionamento del combustibile, dove più opportune si presentano le condizioni di approvvigionamento d'acqua indispensabile per i servizi di condensa e per la alimentazione delle caldaie.

Generatori sincroni ed asincroni. Centrali automatiche.

Fu ricordato prima che per gli impianti a correnti alternate s'era data prevalente preferenza alle macchine sincrone con che, quando lavorano in parallelo, risultano obbligate a marciare tutte al passo per dare correnti ad un unica frequenza. Egli è che quando due alternatori, portati ad avere la identica frequenza si accoppiano tra loro in parallelo o direttamente o attraverso linee nell'istante in cui risultano anche in fase (contemporaneità di valori nulli e di valori massimi della tensione) il collegamento acquista il carattere della stabilità anche se una qualche irregolarità di moto si verifica e ciò per virtù di una *coppia sincronizzante* che tende a frenare le accelerazioni, sia positive che negative, di una qualunque delle macchine, quasi che un vero collegamento elastico esistesse tra esse e paragonabile nell'insieme a quello di tante macchine motrici che muovendo lunghi alberi di trasmissione fossero state, con l'impiego di ingranaggi, rese solidali tra loro, conferendo la dovuta dolcezza al collegamento con interposizione di opportuni giunti elastici fra gli ingranaggi e gli alberi.

Dal che si deduce immediatamente, riflettendo all'esempio meccanico, che se noi vorremo far intervenire nella produzione di potenza una macchina più dell'altra, dovremo agire sulle valvole di introduzione del fluido motore registrando i *variagiri* delle dette motrici, non potendo qui, come fu spiegato in altro capitolo per le dinamo a corrente continua collegate in parallelo, agire soltanto sulla eccitazione, con che l'organo regolatore della motrice entra automaticamente in giuoco per ripristinare l'equilibrio fra coppia motrice e coppia resistente.

Ora il vincolo che obbliga tutti gli alternatori fra di loro allacciati in parallelo a tenere tutti la identica andatura o modificarla di conserva quando occorra, non ha costituito un ostacolo al diffondersi di questi impianti e alle reti di linee da essi dipendenti, perchè i perfezionamenti grado grado introdotti sia nella costruzione degli alternatori come in quella dei regolatori delle motrici idrauliche e termiche, l'impiego giudizioso di volani, di scarichi sincroni, di altri apparecchi di protezione di vario genere, hanno finito col conferire a questi impianti quella *souplesse* che è un attributo indispensabile per garantire la continuità dell'esercizio.

Non è però indispensabile affidare la produzione di energia elettrica a generatori sincroni; è possibile ricorrere a *generatori asincroni* per i quali l'accoppiamento con gli altri sincroni si effettua anche senza il vincolo della sincronizzazione, mentre la variazione di potenza si effettua solo in dipendenza di uno scarto di velocità (in eccesso) rispetto a quella che corrisponde al sincronismo. Queste macchine richiedono però per questo uso l'aggiunta di una apposita eccitrice o essere costruite autocompensate; diversamente assorbono dalle altre centrali a macchine sincrone con cui funzionano in parallelo, delle energiche correnti reattive in ritardo, che vanno ad aumentare le dissipazioni di energia per effetto Joule e provocano cadute di tensioni negli alternatori, nei trasformatori, nelle linee a tutto danno della buona regolazione dell'impianto.

Parrebbero queste macchine per le loro peculiari caratteristiche specialmente indicate per centrali *a funzionamento automatico* essendone le manovre controllate da una centrale maggiore, anche molto distante, facendo intervenire con una determinata successione, operata da un opportuno giuoco di relais, le varie operazioni, in un senso per la inserzione, in senso inverso per la disinserzione. Applicazione che ebbe in America ed in Inghilterra pregevoli ed importanti soluzioni non solo per centrali equipaggiate con macchine sincrone, ma anche per le sottostazioni a convertitori (rotanti e a mercurio) destinate alle alimentazioni di linee ferroviarie e tramviarie. In Italia, dove si potrebbero ridurre automatiche moltissime centrali di non grande importanza e per le quali la spesa di sorveglianza è assolutamente inadeguata alla esigua produzione di energia, il sistema non ha per ora preso largo piede, per quanto i pochi esempi che finora esistono abbiano sempre corrisposto ai requisiti imposti.

Il trasformatore chiave di volta del trasporto di energia.

Fu avvertito precedentemente che il trasformatore statico per correnti alternative fu la chiave

Digitized by Google

di volta per il grande edificio della trasmissione di energia. Ad esso si ricorse per innalzare sempre più le tensioni non appena la tecnica della costruzione degli isolatori per le linee aeree consentiva uno sbalzo in avanti.

Costruiti da principio di piccola potenza e per modeste differenze di potenziale (pochi migliaia di volt) completamente immersi nell'aria, si avvertì che un serio ostacolo alla costruzione di tipi di grande potenza era rappresentato dalla insufficienza della superficie libera lambita dall'aria perchè, mentre la potenza cresce un po' come il peso del ferro e del rame adoperati, se nella identica proporzione si fossero accresciute le superfici utili per lo smaltimento del calore provocato dalle perdite per effetto Joule e da quelle per fenomeni parassiti nel ferro, ne sarebbero risultati degli apparecchi enormi e costosissimi. Si pensò allora al rapido rinnovo dell'aria attorno al trasformatore a mezzo di ventilazione artificiale; ma molto più efficacemente si raggiunse l'intento immergendo il trasformatore in un bagno d'olio minerale (di qualità opportuna) il quale, oltre ad essere un buon isolante e, come tale, capace di ripristinare automaticamente un isolamento nell'interno del trasformatore qualora una sovratensione avesse provocato una perforazione, è anche un ottimo conduttore del calore, di gran lunga superiore all'aria. Si potè in tal modo sottrarre dall'apparecchio una più ragguardevole quantità di energia dipendentemente da un prestabilito salto medio di temperatura fra le sue parti interne e l'ambiente esterno arrivando in tal modo a ridurne convenientemente le dimensioni. L'energia dissipata sotto forma di calore trova il suo smaltimento sulla superficie del cassone contenente l'olio, superficie che può essere debitamente accresciuta con nervature od ondulazioni della lamiera.

Che se la potenza del trasformatore raggiunge qualche migliaio di kilowatt (si costruiscono oggi trasformatori di 20 ÷ 30.000 kilowatt) allora occorre intensificare la circolazione dell'olio, stabilendo comunicazioni con tubi o canali metallici esterni fra la parte alta e bassa del trasformatore; oppure — e meglio — facendo circolare l'olio all'esterno a mezzo di una pompa centrifuga immergendo il serpentino metallico in cui fluisce in acqua fredda di continuo rinnovata.

L'impiego dell'olio (una qualità che si ottiene nella distillazione frazionata del petrolio, ben purificato e assolutamente privo di umidità) fu decisivo per l'ottenimento di alte ed altissime tensioni. Si pensi che — quando corrisponde in pieno alle prescrizioni — occorrono circa 60.000 volt di differenza di potenziale fra due sferette di 10 millimetri di diametro in esso immerse alla distanza di 5 millimetri per consentire fra di esse una scarica! Ma è indispensabile impedire che nel cassone penetri l'umidità che farebbe scendere rapidamente il potere coibente. L'olio si dilata notevolmente, ma non essendo opportuno far entrare in pressione il cassone, si ricorre ai *conservatori d'olio*, recipienti sovrapposti ai cassoni e con essi in comunicazione mediante una tubazione di raccordo che immette sul fianco del conservatore. In essi uno strato d'olio (che rimane pressochè alla temperatura dell'ambiente) stabilisce la chiusura ermetica, mentre l'umidità eventualmente assorbita dall'esterno si deposita sul fondo del conservatore, da cui può essere di quando in quando estratta.

Rimaneva però una ultima difficoltà da superare. L'uscita dei conduttori dal cassone del trasformatore. All'esterno di un conduttore portato ad alta tensione esiste un campo elettrostatico e la forza con la quale la carica elettrica tende a sfuggire dal conduttore formando quella che si chiama una scarica è tanto maggiore quanto più alto è il potenziale elettrico sul filo, quanto più grande è la sua curvatura (cioè piccolo il diametro); quanto più prossimi sono i corpi metallici, in comunicazione con la terra, che lo circondano. E detta forza, se l'isolante interposto è unico, è inversamente proporzionale alla distanza, risultando massima alla superficie del filo e nulla sul corpo metallico circostante. Può così l'isolante, nella parte aderente al filo, risultare soverchiamente sollecitato, onde si è pensato ai così detti *passaggi a condensatore* dove fogli di stagnola di altezza decrescente avvolgenti successivi strati di isolante determinano un gradiente di potenziale meglio distribuito agli effetti delle accennate sollecitazioni che restano discretamente distribuite fra i detti strati cilindrici di isolante.

Con questo espediente si è potuto far uscire da un cassone di trasformatore conduttori anche a 200.000 ÷ 300.000 volt di potenziale, passando il conduttore lungo l'asse del così detto *passaggio a condensatore*, attraverso un foro circolare praticato nel cassone di non più di 15 ÷ 20 cm.

La trasmissione di correnti polifasi.

Di regola le grandi trasmissioni si effettuano con correnti polifasi, solitamente trifasi soltanto. Queste sono fornite da tre trasformatori statici monofasi, opportunamente collegati, sia i primari che i secondari, *a triangolo* oppure *a stella*; oppure — e più frequentemente — la terna di tensioni trifasi, fra loro spostate di fase nel tempo di ⅓ di periodo, vengono già fornite da un solo trasformatore, il nucleo magnetico del quale, composto da tre colonne, magneticamente collegate in alto e basso, porta per ognuna di esse adeguati avvolgimenti primari e secondari.

La connessione a triangolo si chiama anche *chiusa* perchè i tre avvolgimenti primari (o secondari, a seconda) formano un circuito chiuso su se stesso, esattamente come la spirale di un anello Pacinotti (Vedi al capitolo delle Dinamo), le prese per l'esterno fatte ai punti di collegamento di un avvolgimento col successivo. In questo circuito chiuso non vi è forza elettromotrice risultante.

La connessione a stella si chiama anche *aperta*, perchè i 3 avvolgimenti hanno tre estremità in comune formanti un centro mentre le altre vanno a collegarsi alla linea. Dal centro parte talvolta, un così detto *filo neutro*.

A parità di forza elettromotrice indotta in ognuno dei tre avvolgimenti il collegamento che consente la

Digitized by Google

maggior differenza di potenziale fra i conduttori di linea all'esterno, è il collegamento a stella; precisamente $\sqrt{3} = 1{,}7$ volte quella che compete al collegamento a triangolo. Si comprende da ciò come sia il preferito per le grandi trasmissioni dove interessa disporre di alte differenze di potenziale, limitando al minimo compatibile le tensioni interne degli avvolgimenti del trasformatore.

E qualora si intenda di portare la normale tensione di esercizio oltre i 200.000 volt efficaci fra due conduttori di linea, il che rappresenta una tensione di $\sqrt{2} \times 200.000 = 284.000$ volt per l'istante in cui si presenta il valore massimo, si porta il centro della connessione aperta (stella) stabilmente al potenziale della terra. Disposizione questa che — frequentissima in America — è ancora sotto esperimento da noi, occorrendo accertare quali sono o quali potrebbero essere gli inconvenienti sulle linee telegrafiche e telefoniche dello Stato.

Gli interruttori.

Riservandoci di accennare in altro paragrafo ai fenomeni di sovratensioni, possiamo dire che l'energia elettrica uscendo dal trasformatore passando per un interruttore per tensione corrispondente a quella della linea, raggiunge quest'ultima, iniziandosi allora il vero trasporto a distanza. Gli interruttori di collegamento fra trasformatori e linee, quando sono in giuoco altissime tensioni e grandissime correnti, assumono dimensioni considerevolissime. Gli organi di apertura e chiusura di circuiti sono sempre immersi nell'olio per ridurre al minimo la importanza degli archi che inevitabilmente si formano e non infrequentemente gli interruttori sono provvisti di *camere di esplosione* per impedire le conseguenze che potrebbero derivare dallo sviluppo di gas, dovuti alla dissociazione dell'olio nelle immediate vicinanze degli archi al momento dell'apertura.

Anche qui la tecnica ha gradatamente trionfato di un cumulo di difficoltà che hanno costituito per un certo tempo ostacolo all'impiego di altissime tensioni. Ma oggi si può arrivare ad interrompere bruscamente a mezzo di un solo interruttore parecchie decine di migliaia di kilowatt a tensioni dell'ordine di 200 ÷ 300 mila volt.

Le linee.

Dal punto di vista meccanico non si sono mai presentate serie difficoltà alla costruzione di grandi linee di trasporto. Abbiamo l'esempio di campate grandissime, anche di 2 ÷ 3 chilometri per superare bracci di mare, fiord o superare profonde vallate. Da noi in Italia campate di molte centinaia di metri per traversare grandi fiumi, come il Pò, sono comuni. Si è previsto di poter attraversare lo stretto di Messina (2600 m.) con una conduttura aerea per portare l'energia elettrica dalla penisola alla vicina Sicilia, erigendo sopra le colline ai due lati adeguate torri in ferro a traliccio, ciò che avrebbe per risultato di portare a circa 4 chilometri la campata reale. Per queste lunghe traversate occorrono conduttori cordati speciali e amarraggi studiati opportunamente.

Generalmente si dà la preferenza ai tralicci in ferro per le palificazioni, con sostegni posti intorno a 200 metri l'uno dall'altro. Ma da qualche anno furono impiegati con successo anche pali di cemento armato centrifugato. Il legno — almeno da noi — serve soltanto per le linee di minore importanza.

Serie difficoltà invece presentarono gli isolatori, in porcellana di regola, ma non escluso il vetro. Fatti in un sol pezzo quando le tensioni si limitano a 20 ÷ 30 mila volt, sono costruiti in più pezzi e poi saldati insieme quando si salga oltre quei limiti e semprechè non si superino i 70 ÷ 80.000 volt. Per più alti valori della differenza di potenziale si abbandonano i così detti isolatori rigidi a pernotto e si preferiscono *catene di isolatori*, a quello inferiore assicurando il filo o la treccia e fissando quello in testa alla mensola sporgente dal traliccio o dal palo di cemento centrifugato. Così parrebbe, aumentando il numero degli isolatori di ogni catena, di poter elevare a piacimento la tensione in linea. Ma così non è: perchè le mensole e i tralicci rappresentano delle capacità in derivazione, rispetto alle capacità in serie di una catena di isolatori; il che ha per conseguenza che la ripartizione delle sollecitazioni elettrostatiche per i singoli isolatori di una catena non è uniforme. Il più basso (verso il conduttore) sostiene già il 25 ÷ 30 % della totale tensione; il più alto (verso la mensola) sostiene appena il 5 %. E poichè conviene costituire le catene con isolatori identici, così per non esagerarne le dimensioni e il peso, si è costretti a non sorpassare i 120 ÷ 150.000 volt fra un filo e la mensola (terra). Espansioni metalliche in forma di corna applicate all'isolatore più basso mirano anche ad attenuare la sollcitazione dell'ultimo isolatore della catena.

Il conduttore è — di regola — una treccia di rame. Non si va al di là di 150 mmq. di sezione; piuttosto si costruiscono due terne, con che una può ancora rendere possibile un esercizio ridotto, se l'altra venisse messa momentaneamente fuori esercizio per un guasto. In altri paesi si è talvolta preferito l'alluminio, anche perchè a pari conduttività occorre un diametro maggiore che non per il rame e si attenua così il *fenomeno corona*.

L'origine di questo fenomeno è da ricercarsi nell'elevato gradiente del potenziale in prossimità al conduttore (vedasi indietro, pag. 298, a proposito dell'uscita dei conduttori dai cassoni dei trasformatori) e si esplica sotto forma di *effluvio* che porta ad una dissipazione di energia. La tensione critica a cui l'effluvio prende origine (con che durante la notte i conduttori diventerebbero visibili) è tanto più piccola quanto minore è il diametro dei conduttori e cresce col logaritmo del rapporto fra la distanza degli assi dei due conduttori ed il raggio di essi. Dipende ancora dalla densità dell'aria, con che il fenomeno dissipativo si accentua notevolmente con tempo umido e piovoso.

Qualora per distanze sempre maggiori da superarsi e quantitativi di potenza sempre più ragguar-

Digitized by Google

devoli da trasportarsi occorresse sorpassare i limiti di tensione efficace già ricordati fra due fili di linea del sistema trifase, bisognerà, per non cimentare eccessivamente le catene di isolatori, funzionare con il così detto *neutro a terra* sia alla partenza che all'arrivo, mantenendo cioè il centro degli avvolgimenti del trasformatore di partenza e di quello di arrivo, collegati a stella, permanentemente a terra; Sistema che ha concesso in America di elevare fino a 220 ÷ 250 mila volt la differenza di potenziale efficace fra due conduttori. Esperimentato da noi non dette luogo che a qualche inconveniente nei vicini impianti telegrafici e telefonici, ma si confida di escogitare provvedimenti efficaci per consentire la coesistenza dell'esercizio con esso sistema e contemporaneo funzionamento di tutte le comunicazioni con fili.

E poichè, quanto più si eleva la differenza di potenziale di esercizio, tanto più e tanto meglio occorre provvedere al perfetto isolamento di tutte le parti del complesso congegno, così si arriva a sistemi quasi autoprotetti, indifferenti a tutte le sovratensioni occasionali e di carattere transiente, dovute a cause interne sia a cause meteoriche esterne, e che rappresentano per impianti a più modeste tensioni argomento di disturbo non sempre lieve nelle sue conseguenze. E di ciò sarà detto brevemente in appresso.

Effetti della induttanza e capacità delle linee.

Fu accennato indietro che non sempre il valore massimo della corrente è simultaneo col valore massimo della tensione, pur trattandosi di fenomeni periodici di egual frequenza. Egli è che la corrente obbedisce, istante per istante, alla legge di Ohm e se nell'istante in cui la tensione impressa ha il valore massimo, è pure presente nel circuito una forza elettromotrice comunque prodotta, la corrente non può obbedire che alla loro risultante. Orbene; la corrente alternata con le variazioni del flusso magnetico che si concatena col circuito dove essa si stabilisce è pure essa causa di origine di forza elettromo trice reattiva; forza elettromotrice che è nulla quando la variazione del flusso magnetico è nulla (il che accade quando la corrente - e perciò il flusso magnetico raggiunge il suo valore massimo) e raggiunge valor massimo al momento in cui la corrente si inverte di direzione. E quanto al senso (legge di Lenz) tende sempre ad opporsi, con la corrente cui da sola darebbe luogo, alle variazioni da cui essa ha tratto l'origine sua.

La presenza di questa forza elettromotrice (di *autoinduzione*) ha per conseguenza di far ritardare la corrente rispetto alla tensione impressa; non solo, ma di ridurre anche il valore che — in sua assenza — prenderebbe la corrente. A parità di altre condizioni il ritardo è tanto più ragguardevole quanto più elevata è la frequenza.

Per converso se con la corrente elettrica alternativa si arriva a caricare un condensatore, allora nasce una *corrente di spostamento*, per la reazione che il dielettrico oppone alla differenza di potenziale che lo sollecita; e questa corrente è in anticipo di fase rispetto ad essa, analogamente di quanto avverrebbe se un fluido contenuto in un sacco a pareti elastiche si sottoponesse ad una pressione alternativa.

Ora in una linea di trasmissione è presente l'induttanza (rappresentata dal flusso magnetico prodotto dalla corrente) ed è presente la capacità perchè i fili che corrono paralleli tra loro, col dielettrico (aria) che li separa, formano un condensatore; ed un condensatore formano pure i conduttori con la terra. Ma mentre le induttanze elementari sono collegate in serie, le capacità elementari sono collegate in derivazione, perciò non nasce una compensazione fra il *ritardo* che la corrente subisce per l'autoinduzione della linea e l'*anticipo* dovuto alla capacità. Il fenomeno assume un aspetto enormemente più complesso, procedendo tanto la tensione come la corrente come un'onda; ma di ciò occorrerebbe tenere conto solo per trasporti a molte centinaia di chilometri e particolarmente quando la frequenza impiegata fosse molto elevata.

I fenomeni propri della capacità sono particolarmente sensibili a vuoto o a carichi bassissimi, potendosi allora avere all'arrivo tensioni molto più elevate che alla partenza, fenomeno detto di *Ferranti* essendo stato constatato per la prima volta dall'ingegnere inglese Ferranti in una distribuzione con cavi dove la capacità chilometrica è sempre molto elevata, rispetto a quella di una corrispondente linea aerea. Nei grandi trasporti di energia occorre tener presente questo effetto disponendo di mezzi opportuni per regolare la tensione; e di ciò è cenno nel paragrafo seguente.

L'impiego del condensatore rotante.

Accessorio molto importante dei grandi trasporti di energia è diventato in questi ultimi tempi il *condensatore rotante*, motore sincrono trifase funzionante a vuoto e come tale capace di comportarsi come un condensatore inserito in parallelo sulla linea, però a capacità non distribuita, ma localizzata.

Per spiegare questa azione occorre rammentare che se si fa agire a rovescio un ordinario alternatore trifase, esso funzionando da motore a vuoto, assorbe dalla linea pura corrente attiva soltanto quando l'eccitazione sua è regolata a tal punto da produrre una fem. capace di bilanciare la tensione impressa ai suoi morsetti meno le cadute di tensione (ohmiche e reattive) interne della macchina. Se si eccita meno, il motore sincrono attinge dalla linea l'ecccitazione mancante sotto forma di corrente reattiva in ritardo. Se invece l'eccitazione è esuberante esso restituisce l'eccesso alla linea sotto forma di corrente reattiva in anticipo; la quale corrente reattiva in anticipo avendo funzione smagnetizzante per il motore sincrono, ne riaccompagna la eccitazione al giusto valore.

Corrente reattiva in anticipo è capace di produrre anche un condensatore statico donde la denominazione di condensatore rotante al motore sincrono che può tenerne le veci; con questo di diverso che per il secondo l'azione può essere facilmente registrata agendo sulla sua eccitazione.

Digitized by Google

Ora se si inserisce in parallelo un condensatore sopra una linea a correnti alternative, con un apparecchio (trasformatore, motore asincrono, ecc.) richiedente dalla linea una corrente reattiva in ritardo, se le cose sono regolate in modo che la intensità di questa corrisponda a quella in anticipo del condensatore, le due — sulla linea — si compensano esattamente e in essa linea non rimane che la corrente attiva, a parte l'effetto dell'induttanza e della capacità propria della linea.

Un grande condensatore rotante può dunque riuscire di grande efficacia se installato in un nodo o sottostazione da cui si dipartono linee destinate ad alimentare apparecchi induttivi, perchè per sua virtù la linea può essere ricondotta alla pura funzione di trasporto di energia utile, cioè che procede in un solo senso, restando soppressa quella che — diversamente — dovrebbe di continuo palleggiarsi, in rapidissima spola (2 volte ad ogni periodo della corrente alternata) fra generatore e ricevitori. E molte linee anche in Italia, costrette un tempo a portare per ogni 100 ampère di corrente attiva altrettanti (e forse più) di corrente reattiva, furono decisamente rigenerate da questo provvedimento, perchè prima, vuoi per le perdite per effetto Joule, vuoi per le esagerate cadute di tensione in linea, nei trasformatori ($3 \div 4$ successivi talvolta) e nei generatori, il servizio era diventato pressochè impossibile.

D'altra parte, poichè dalla presenza di correnti in ritardo in linea o corrente in anticipo, vi può essere all'arrivo o forte depressione di tensione o tensione esagerata (a vuoto, per esempio) il condensatore rotante diventa un prezioso *regolatore di tensione* bastando eccitarlo fortemente per provocare correnti in anticipo in linea al fine di contenere entro limiti ristretti le cadute di tensione, oppure agire anch'esso come apparecchio induttivo (in condizione di sotto-eccitazione) per farle invece crescere ove risulti troppo forte la tensione in partenza, la quale, per altre ragioni che sarebbe troppo lungo qui esaminare, può darsi occorra mantenere inalterata, oppure vi sia da attenuare o paralizzare l'effetto Ferranti di cui dianzi si è parlato. Riassumendo può consentire il condensatore rotante di regolare entro certi limiti la tensione in arrivo di una linea, senza che ciò implichi la regolazione di tensione in partenza.

L'impiego dei cavi.

Non è solo con linee aeree che si effettuano grandi trasporti di energia. Innumerevoli sono i casi in cui per specifiche difficoltà locali si dà la preferenza ai cavi, anche quando la tensione di esercizio raggiunge parecchie decine di migliaia di volt.

La tecnica costruttiva dei cavi, così detti a torcitura (tre corde di rame, ciascuna debitamente isolata con materiali isolanti stratificati secondo il loro potere dielettrico, vengono poi riunite ancora a treccia e isolate nuovamente, forzando sopra il complesso un mantello continuo di piombo, non infrequentemente poi rivestito ancora di juta catramata e poi di una doppia spirale piatta di ferro a formare mantello di protezione e infine una ultima fasciatura di juta; con che il cavo può avvolgersi sopra tamburi di legno per il trasporto, svolgersi, adattarsi entro cunicoli e trincee, piegarsi a seconda dei bisogni, raggiungere il punto prescritto) ha fatto progressi straordinari. Pareva che tensioni superiori a $60 \div 70$ mila volt fra conduttore e conduttore dovessero essere proibitive per i cavi; ma con cavi unipolari si sono raggiunti anche 100.000 volt fra conduttore centrale e mantello esterno (Ferrovia elettrica del Sempione). L'ultima parola in materia (almeno pel momento) fu detta da un genialissimo ingegnere italiano, l'Emanueli della Società Pirelli, che immaginò il *cavo vuoto*, per forzare nella cavità assiale dell'olio minerale sotto leggera pressione e destinato a mantenere sempre bene impregnato il rivestimento con un fluido di squisite caratteristiche isolanti. Così si potè forzare la sollecitazione normale fino a 130.000 volt. Gli esperimenti hanno dato così felici risultati che la Compagnia Edison di New York lo ha adottato per un grande trasporto di energia attraverso quella immensa metropoli.

L'esercizio. I risultati raggiunti.

Così superando grado grado difficoltà non indifferenti, elevando sempre più le tensioni, migliorando, perfezionando tanti dettagli, indispensabili anche essi per la perfetta riuscita, nel funzionamento, di questo mirabile congegno, si è arrivati alle mastodontiche centrali o termoelettriche o idroelettriche di parecchie centinaia di migliaia di kilowatt, alle linee di molte centinaia di chilometri di lunghezza, sottoposte a tensioni che non più tardi di vent'anni fa si sarebbero dette paurose.

E quanti, quanti insuccessi nell'esercizio! Innanzi tutto si presentò il problema di far marciare in parallelo, non le sole macchine di una centrale, ma molte centrali, sparse qua e là in una provincia, in una regione. Problema capitale per una questione principale di mutua assistenza in caso di bisogno o per deficenza di energia idraulica o per guasti di macchinario, per effettuare scambi preziosissimi di energia fra regioni sottoposte a regimi idrici molto diversi dei fiumi, per soccorrere con quantitativi di energia accumulati in acqua in laghi e serbatoi naturali o artificiali, le penurie dei fiumi soggette alle magre estive o jemali. E l'Italia, in questo argomento, ha preso posto nei primi ranghi fra le nazioni dove largamente si è diffuso l'impiego della energia elettrica, non soltanto con iniziative tecniche del più alto valore, ma anche con vedute lungimiranti di carattere economico e sociali, dettando savie leggi in materia di elettrodotto e in materia di razionale utilizzazione dei corsi d'acqua.

Nè minori preoccupazioni diedero gli isolatori delle linee, i grandi trasformatori per altissime tensioni, gli interruttori, tanti altri accessori. Perchè se pure per le condizioni normali di esercizio a tutto si era riusciti prevedere, bastava che una brusca disinserzione dovuta per esempio a corti circuiti o qualche scarica temporalesca provocasse o esagerasse correnti o improvvise sovratensioni a grandis-

Digitized by Google

sima frequenza (e perciò a fronte molto ripido) per far si che qualche parte vitale del sistema ne risultasse gravemente compromessa. Imponenti sforzi meccanici mettevano in forse la compagine delle macchine o dei trasformatori, ingenti sviluppi di energia termica potevano arrostire gli isolanti, le sovratensioni a fronte ripido perforavano isolamenti fra spire e spire, fra strato e strato, fra strati e massa; oppure, impercettibili prima, ma sempre più penetranti, incrinature di isolatori dando luogo finalmente a labili contatti a terra, provocavano attraverso le capacità del sistema, violenti cortocircuiti, si dà comprometterne a lungo o addirittura impedire il funzionamento dell'impianto fino alla localizzazione del guasto.

Nè la tecnica mai si stancò di venire in soccorso con dispositivi preventivi e protettivi. La sola elencazione degli apparecchi immaginati per proteggere le parti vitali degli impianti o contro le sovracorrenti o contro le sovratensioni richiederebbe molte colonne di questo giornale. E questo capitolo destinato ai grandi trasporti di energia è già troppo lungo per consentire sia pure un semplice accenno sull'argomento.

Oggi stiamo avvicinandoci a qualche cosa di praticamente perfetto, atto a rispondere a tutte le gravi esigenze dell'industria; industria multiforme, quella che va dal piccolo minuscolo artigiano, a quella del grande poderoso industriale che dà lavoro a migliaia di operai; che provvede alla illuminazione della modesta stamberga sperduta fra le montagne o inonda di torrenti di luce le fantastiche scenografie di un grande teatro; che provvede a congestionare e decongestionare con tramvai o ferrovie elettriche le grandi metropoli, essa stessa l'energia elettrica colpevole in parte di questa frenesia di vivere accastati, entro alveari, lasciando deserta la campagna dove si respirerebbe l'ossigeno a pieni polmoni; che si incarica, nel campo della elettrochimica o della elettrometallurgia, di produrci le scomposizioni o le associazioni più difficili, consentendoci anche di arrischiare l'opinione che non fosse utopia quella degli alchimisti di tramutare un metallo in un altro!

Ma per tutto questo occorrono organizzazioni mirabili, dove più non sappiamo se la sagacia amministrativa, la perspicacia industriale, la profondità tecnica, eccelle od emerge. Affidata la prima a pochi e grandi gruppi finanziari, delegata la seconda a pochi e grandi capitani d'industria, esplicata la terza da una schiera di valorosissimi tecnici sempre attenti all'avviso dei grandi scienziati, tanto più perfetto riuscirà l'esercizio di uno di questi grandi organismi quanto più ristretto sarà il numero dei veri responsabili di un qualsiasi disguido, di una falsa manovra, di un ordine intempestivo. Perciò sempre più si afferma la necessità di un vero *dispätscher*, cui è delegato il comando centrale ed al quale tutti debbono obbedire. Ecco il telefono assumere importanza preminente nella manovra di così caratteristico esercito: e perchè questo non abbia mai a mancare nella sua decisiva funzione ecco la trasmissione del comando con onde convogliate lungo gli stessi fili della trasmissione oppure addirittura l'impiego della radiotelegrafia o della radiotelefonia.

I risultati conseguiti in Italia.

È veramente un titolo di gloria per l'Italia, uno dei segni più caratteristici della sua razza, l'aver saputo intendere a tempo che, nella sua povertà di carbone, che altrove si dimostrava come uno fattori più decisivi per lo sviluppo economico di un paese, l'utilizzazione delle sue forze idrauliche avrebbe potuto egualmente consentirle di raggiungere un posto di primissimo ordine fra le nazioni industriali. Era il sogno di Cavour che con le fatidiche parole: *poter trasformare dell'acqua che cade in forza portatile! questo farebbe pel nostro paese quello che hanno fatto le macchine a vapore per l'Inghilterra*, pronunciate il 29 Giugno 1854 nel Parlamento Subalpino, aveva avuto nella manifestazione di un desiderio, una divinazione stupenda! Ed è proprio la forza idraulica trasformata in forza portatile per eccellenza, quella che l'energia elettrica ha messo così largamente a disposizione!

Ora lo sviluppo industriale di questi ultimi 30 anni è indubbiamente uno dei segni più caratteristici della evoluzione materiale e morale italiana, e si può senza esitazione affermare che lo sviluppo della sua industria idroelettrica sarà la base granitica di tutta la sua vita.

E, come già fu dianzi avvertito, con una grande anticipazione su quello che avvenne in altri paesi, si ebbe subito in Italia la sensazione della necessità di non far servire una centrale ad un solo scopo determinato in congiunzione con una determinata linea, bensì di collegarne molte ad una vasta rete per servire i bisogni di una estesa regione. Che se, per molte ragioni, non fu possibile avere tutti gli impianti italiani accordati sopra una *frequenza unica*, si è provveduto egualmente a rendere possibili gli scambi di energia fra regioni contermini mediante grandiose centrali sussidiarie per la trasformazione della frequenza. E ancora, nulla si omise per dare agli impianti idraulici quel caratteristico aspetto per il quale l'acqua non si stanca mai di agire finchè vi è un dislivello da utilizzare, prendendola nella regione quasi della neve eterna e portandola fino al piano; migliorando e modulando i deflussi con intercalazione di laghi e serbatoi artificiali e compensando i diversi regimi idrici delle zone alpine ed appenniniche con gli scambi di energia elettrica a mezzo delle grandi linee di interconnessione. E quando anche nell'Italia Meridionale, il vasto programma di opere progettate darà i risultati previsti, anche in quelle zone l'industria si svilupperà rapidamente e la diffusione dell'energia elettrica non tarderà ad accentuare l'ascensione morale e materiale di quelle popolazioni che anelano di mettere in valore, come quelle del settentrione, le proprie energie intellettuali e le loro capacità al lavoro.

Non sfugge a nessuno come la tradizione nazionale della scienza idraulica e quella non meno gloriosa dell'arte della costruzione di opere murarie siano stati due fattori importantissimi per facilitare la creazione e l'organizzazione rapida di una potente industria elettrica. Una folla di giovani tecnici, entusiasmati dalle seduzioni che esercita questa magica energia elettrica, apportarono all'industria tutto

Digitized by Google

il contributo della loro fattività intelligente ed ardita. E trionfarono di difficoltà enormi riuscendo a capolavori del genere che il tecnico estero, dovunque provenga, è costretto ad ammirare, per la genialità della concezione, per la semplicità delle soluzioni, per la armonia dell'insieme di tutte le svariate parti.

Per chi volesse seguire grado grado lo sviluppo di questa meravigliosa industria italiana, partendo dallo slancio preso fin dal 1900 e — salvo piccole stasi — non mai interrottosi, non avrebbe che da esaminare le ormai numerose statistiche (1) e in particolare quelle della Associazione Elettrotecnica Italiana e quella del Ministero dei Lavori Pubblici ed altre ancora e se le confrontasse con quelle di altri paesi, pure discretamente provvisti come il nostro di forze idrauliche, tenendo conto dei fattori economici che giuocano una importanza preponderante, si accorgerebbe che lo sforzo fatto dall'Italia fu gigantesco e che essa, col continuarne il ritmo prepara indubbiamente uno splendido avvenire alla multiforme attività della industria nazionale.

Sonvi ormai circa 2½ milioni di kilowatt di macchinario installati distribuiti sopra 33 centrali termiche e 11 termiche di potenzialità superiore a 15.000 kilowatt mentre oltre 250 idrauliche e circa 100 termiche di potenzialità inferiore completano il quadro alla fine del 1925. Ma stanno per essere ultimate o sono in corso di avanzata costruzione altre 20 centrali idroelettriche per una potenza complessiva di circa 400.000 kW, di cui quella sull'Isarco conta da sola per circa 120.000 kilowatt.

Tanto si resero palesi i benefici dei laghi e serbatoi artificiali che, ad onta del loro costo oggi elevatissimo, non si indietreggia dinanzi a nessun ostacolo per poco che si presentino possibili; così che i 135 (fine 1926) esistenti per una capienza complessiva di circa 650.10^6 mc. di capacità, diventeranno fra pochi anni 200 con una capacità complessiva più che doppia.

Circa 45.000 km. di linee ad alta tensione per vero trasporto di energia (escluse dunque quelle di distribuzione ad alta e bassa tensione) collegano le centrali tra loro e le innumerevoli sottostazioni, incrociandosi in tutti i modi, più piccole essendo le maglie nell'Italia settentrionale, molto grandi essendo ancora quelle dell'Italia meridionale.

Nella grande industria della produzione, trasporto e distribuzione della energia elettrica, il risparmio italiano è impegnato con un capitale di circa 7 miliardi di lire.

L'energia prodotta in Italia nell'anno 1926 si stima, secondo dati molto attendibili di 7 miliardi di kilowattora (di cui circa 230 milioni importati dalla Svizzera) che corrisponde a circa 166 kilowattora per abitante, se riteniamo che di 42 milioni sia la sua popolazione. Orbene; se riduciamo a 20 milioni soltanto la parte di popolazione valida, capace di continuare per 10 ore un lavoro di 10 kilogrammetri al minuto secondo, bisognerebbe che tutti questi 20 milioni fossero dannati a girare eternamente la mola o qualcosa di simile per raggiungere una eguale somma di lavoro in un anno. Da ciò si può comprendere quale straordinaria forza di elevazione morale sia questa energia elettrica, che come una linfa benefica si infiltra ormai in tutte le manifestazioni della umana attività.

Se una eguale quantità di energia si dovesse produrre col carbone a mezzo di macchine a vapore, non basterebbero 7.10^6 tonn. con un valore non inferiore a 1½ miliardo che dovrebbe emigrare all'estero annualmente.

Dei 7 miliardi di kilowatt prodotti si può ritenere che un 20 % vadano dissipati in perdite e che del rimanente appena il 9 % sia riservato a scopi di illuminazione, 8 % ai tramvai e ferrovie, il 12 % alle industrie tessili, l'11 % all'elettrochimica e alla elettrosiderurgia, il 13 % alle industrie meccaniche, l'8 % all'industria della macinazione, pure l'8 % alle industrie alimentari, il 9 % alle industrie metallurgiche, i rimanenti 20 % per le altre industrie svariatissime compresa l'agricoltura.

Ma mentre in Italia l'aliquota per abitante è di 166 kilowattora annui ed in Germania si aggira sui 200, gli Stati Uniti fanno un consumo di energia elettrica che corrisponde a 530 kilowattora per abitante. Abbiamo dunque una strada immensa da percorrere per raggiungere i consumi americani, ma li raggiungeremo presto — è sperabile —. Le statistiche mostrano come i consumi abbiano raggiunto in Italia un gradiente del 13 % d'aumento negli ultimi anni. Così procedendo, in $7 \div 8$ anni si avrà nettamente raddoppiata la produzione della energia elettrica dell'Italia e occorrerà per questo mettere in valore un altro milione e mezzo di kilowatt, come potenza delle centrali. Abbiamo ancora riserve per potenze di molto superiori e dobbiamo guardare l'avvenire con piena fiducia.

Bastano queste poche cifre per dare in forma estremamente sintetica un quadro riassuntivo della grande industria elettrica in Italia, che Volta per primo rese possibile con l'invenzione di un meraviglioso apparecchio: la pila, perchè prima di essa, corrente elettrica non era stato possibile produrre. Di scoperta in scoperta, d'invenzione in invenzione, tutte le Nazioni hanno contribuito al successo nel mondo di tutte le applicazioni dell'elettricità; ma poche, come l'Italia, hanno titoli eminenti di gloria, perchè la dinamo-elettrica è uscita perfetta dalla mente di Pacinotti e il campo rotante da quella di Galileo Ferraris, senza contare che è di lui la teoria del trasformatore statico a correnti alternate, chiave di volta del grande edificio del trasporto della energia a distanza.

(1) Ass. Elettrol. Ital.: *Statistica degli Impianti Elettrici*. Vol. II – Ministero Lavori Pubblici: *L'energia elettrica in Italia*. Pubblicazione annuale – Ing. Domenico Civita: *Lo sviluppo della industria elettrica in Italia e la legge di elettrodotto del* 1894. Roma, 1925.

Digitized by Google

Digitized by Google

ING. PROF. GIANCARLO VALLAURI

R. SCUOLA D'INGEGNERIA DI TORINO

RADIOCOMUNICAZIONI

Digitized by Google

Digitized by Google

I.

LA TEORIA DEL MAXWELL E L'INVENZIONE DEL MARCONI.

1. - *La elettrofisica newtoniana.*

La elettrofisica della prima metà del secolo scorso, sbocciata nel glorioso periodo voltiano, si inspirava a due principi fondamentali: l'esistenza dei fluidi agenti (elettrico e magnetico) e l'esistenza di azioni a distanza tra le masse di tali fluidi. La evoluzione dell'elettrofisica nei tempi più recenti ed il meraviglioso slancio dell'elettrotecnica son derivati innanzi tutto dallo sviluppo e dalle trasformazioni, che quei principi subirono, attraverso acute ricerche sperimentali e geniali sintesi teoriche, per opera dei fisici degli ultimi cento anni.

Il destino dei due principi è stato fatalmente diverso. Mentre del concetto di fluido agente, pur radicalmente rinnovato, non poche tracce sono riconoscibili nelle teoria elettronica, l'idea della possibilità di azioni a distanza nel senso più assoluto, ossia di azioni dipendenti esclusivamente dalla posizione reciproca delle masse agenti, apparisce, nel campo delle azioni elettriche e magnetiche, come definitivamente tramontata.

Il concetto delle azioni a distanza era strettamente legato al dominio dell'elettrostatica e della magnetostatica. In questo le masse agenti si considerano in riposo; il campo elettrico può esser prodotto solo da masse elettriche, quello magnetico solo da masse magnetiche; i due campi sono fra loro affatto distinti, sono newtoniani, ammettono la funzione potenziale.

2. - *Le leggi di circuitazione.*

Ma già lo studio della elettrocinetica e dell'elettromagnetismo, ricevuto l'avviamento e l'impulso decisivo dalla scoperta della pila, mentre apriva nuovi magnifici orizzonti alla ricerca scientifica ed alle applicazioni tecniche, dava la prima scossa alla mentalità newtoniana. Esso dimostra invero, che, non appena le masse si muovono, ecco comparire un campo magnetico per effetto del movimento delle masse elettriche ed un campo elettrico per effetto del movimento delle masse magnetiche, i quali non sono campi newtoniani, non ammettono potenziale.

Questi fatti, già accertati sotto la forma della legge di integrazione del campo magnetico intorno ad una corrente elettrica (legge del campo elettromagnetico) e della legge di integrazione del campo elettrico intorno ad un flusso magnetico variabile (legge dell'induzione elettromagnetica), facevano presentire, che la elettrofisica newtoniana non poteva essere tutta l'elettrofisica e che forse la mentalità newtoniana, anzichè un aiuto, poteva diventare un ostacolo ad una più vasta comprensione dei fenomeni elettromagnetici. Di tale pericolo si ebbe una decisiva riprova assai più tardi, quando, di fronte all'invenzione del Marconi, furono sollevate da uomini di scienza obiezioni di impossibilità, che rivelavano nettamente una mentalità newtoniana del tutto anacronistica e pure tenacemente superstite.

3. - *La teoria del Maxwell.*

È degno di rilievo il fatto, che la nuova mentalità fu creata dal Maxwell sulla base delle due leggi ora ricordate, le quali pure erano state dedotte ancora secondo lo spirito della elettrofisica newtoniana. La verità, portata alla luce dal Maxwell nella sua comunicazione del 1867 alla Royal Society e tratta dalla geniale utilizzazione del concetto di corrente di spostamento o di polarizzazione, si può infatti riassumere così: « Se son vere le due leggi del campo elettromagnetico e dell'induzione elettromagnetica, le azioni elettromagnetiche si propagano nello spazio con velocità finita ».

Forse è stata ventura per l'umanità, che tale velocità finita fosse così grande da rendere inapprezzabili gli intervalli di tempo necessari alla propagazione entro spazi limitati. Ne nacque l'impressione, che nell'elettrofisica si trattasse veramente di azioni istantanee a distanza; e si potè costruire solidamente quella struttura scientifica, che, sviluppatasi e maturatasi, fornì poi essa stessa le leggi, destinate a demolirla e a creare la nuova e più moderna teoria. Se la velocità di propagazione fosse stata di gran lunga minore, così che i fenomeni di propagazione fossero risultati direttamente apprezzabili, quelle due leggi fondamentali (che noi oggi sappiamo essere

Digitized by Google

solo approssimate o, meglio, incomplete) non avrebbero forse potuto esser formulate; e chi sa se la scienza e la tecnica sarebbero ora al punto in cui sono.

La elettrofisica maxwelliana distrugge dalle radici la elettrofisica newtoniana. Molti, ancor oggi forse, non sentono questo assoluto contrasto. Ciò deriva dal fatto, che la elettrofisica newtoniana può essere considerata come una fisica di approssimazione per il caso limite di velocità di propagazione infinita, e che, nell'affrontare e nel risolvere un grandissimo numero di problemi, tale approssimazione può essere senz'altro accettata. Che anzi, all'epoca della dimostrazione del Maxwell, l'esperienza non consentiva ancora un prova diretta delle deduzioni teoriche, che egli aveva formulato. Magnifico, se pur raro esempio della potenza divinatrice della teoria.

4. - *La radiazione di energia elettromagnetica.*

Gli aspetti della sostanziale differenza tra le due scuole sono molteplici e profondi. Se in una porzione finita di spazio noi produciamo, in un tempo finito, una modificazione di stato elettrico o magnetico o, come si dice, una perturbazione elettromagnetica, la variazione di campo, che ne consegue, si determina istantaneamente in posto, secondo il concetto newtoniano, in ogni punto dello spazio circostante, fino a quelli infinitamente remoti. Secondo il concetto maxwelliano invece la variazione di campo si propaga con velocità finita; e, in un tempo finito, la perturbazione non può aver interessato che una parte limitata di spazio.

Nel primo caso, allo scomparire della causa, deve scomparire simultaneamente l'effetto; e l'energia, che il sistema aveva ceduto al campo, deve, se non fu consumata in posto, ritrovarsi istantaneamente nel sistema, quando il campo scompare. Nel secondo caso l'effetto può sussistere, quando la causa è scomparsa; poichè l'energia, che il sistema ha ceduto al campo, si è svincolata da quello e continua a propagarsi con questo. Se la perturbazione iniziale è periodica, dovuta ad es. ad un fenomeno armonico semplice, si ha nel primo caso un palleggiarsi istantaneo di energia dal sistema perturbatore fino ai più lontani limiti del campo, nel secondo un reale distacco di energia dal sistema e una propagazione con velocità finita, cioè sotto forma di onde di lunghezza determinata. L'energia, messa in giuoco durante una oscillazione, deve estendersi nel primo caso a tutto lo spazio, laddove nel secondo deve restar limitata entro uno strato sferico di spessore finito e può quindi raggiungere una concentrazione (ossia il campo elettromagnetico può raggiungere una intensità) senza confronto maggiore di quella, che la teoria newtoniana farebbe prevedere. In ciò sta il fondamento della possibilità delle radiotrasmissioni e forse anche di più grandiosi trasporti di energia attraverso lo spazio.

In altri termini, il campo elettrico che induce masse elettriche nel conduttore A' B' (fig. 1) per effetto di uno spostamento simmetrico e armonico nel tempo di masse positive e negative nel conduttore A B, non è quello che si dedurrebbe in ogni istante, come effetto newtoniano della posizione delle masse inducenti nell'istante medesimo; nè la f.e.m. in-

Fig. 1.

dotta in A' B' dal campo magnetico variabile è quella che si dedurrebbe come effetto induttivo della corrente circolante in A B a cagione del moto delle masse inducenti. Questi due effetti, che si calcolerebbero l'uno per mezzo di parametri di mutua capacità, l'altro per mezzo di parametri di mutua induzione (dedotti a lor volta esclusivamente dalla configurazione geometrica del sistema e, rispettivamente, dalla permeabilità elettrica e dalla permeabilità magnetica del mezzo), sarebbero di gran lunga più tenui, non appena la distanza fra gli oscillatori sia grande rispetto alla lunghezza d'onda, di quelli che la teoria maxwelliana fa prevedere.

5. - *Le esperienze del Hertz.*

L'esperienza, per opera del Hertz, confermò la previsione teorica. Dato il valore elevatissimo della velocità di propagazione, era chiaro che, per rendere percettibili i fenomeni rivelatori della presenza di onde elettromagnetiche, occorreva sperimentare o su spazi molto estesi o su frequenze estremamente alte. Anche oggi i rami della scienza e della tecnica, in cui è assolutamente necessaria la mentalità maxwelliana, sono appunto quelli, in cui tale condizione è verificata (radiotrasmissioni, trasmissioni industriali di energia su lunghe linee aeree e su cavi, telefonia e telegrafia a grandi distanze, fenomeni transitori di sopratensioni e di sopracorrenti nel macchinario, negli apparati e nelle linee e così via). Ma anche negli altri rami, in cui apparentemente si può restare fedeli alla vecchia mentalità, la nuova consente una penetrazione senza paragone più profonda e una rappresentazione dei fenomeni di gran lunga più completa e soddisfacente, che quella di un tempo, sopra tutto nei riguardi del modo di concepire, con l'aiuto del teorema del Poynting, il flusso di energia nel campo elettromagnetico.

Le prime decisive esperienze del Hertz sono del 1887. Egli diede ad un tempo la teoria e la riprova sperimentale dell'irradiazione elettromagnetica da parte di un oscillatore, dell'esistenza delle onde, della vibrazione trasversale del campo elettrico e del campo magnetico rispetto alla direzione di propagazione, dell'attitudine delle onde ad essere rifratte e polarizzate come le onde luminose; egli stesso misurò la lunghezza d'onda e la velocità di propagazione. Neppure oggi può forse la scienza valutare tutta intera l'importanza di questa mirabile conquista.

Digitized by Google

6. - *L'invenzione del Marconi.*

Le esperienze del Hertz attirarono meritatamente l'attenzione dei fisici; fra gli altri, il Righi le ripeteva e le arricchiva di nuovi sviluppi nello studio di Bologna. Ma, a portare le onde hertziane fuori dalle sale dei laboratori e a lanciarle per gli spazi in servizio immediato della civiltà, occorreva l'intuito geniale del Marconi, che, fin dalle sue prime esperienze del 1895, ebbe di mira l'applicazione delle onde elettromagnetiche alla trasmissione di segnali telegrafici. L'idea di collegare l'oscillatore trasmittente e quello ricevente alla terra e di utilizzare il rivelatore del Branly, già prima studiato anche dal Calzecchi-Onesti, la tenace battaglia e la vittoria su tutte le innumerevoli difficoltà pratiche, che si oppongono a chiunque voglia trasformare in una realtà tecnica una possibilità teorica, e, impulso e guida a tutta questa opera, la fede assoluta nella fondatezza di quel primo magnifico intuito, legano indissolubilmente il nome del Marconi all'invenzione della radiotelegrafia. E basterebbe il numero imponente delle vite umane, che le radiocomunicazioni hanno salvato salvano e salveranno dalla morte nelle solitudini degli oceani, per collocare il Marconi fra i più grandi benefattori dell'umanità.

7. - *Gli aspetti della radiotecnica.*

Dischiuso, dal genio di un italiano, il nuovo campo vastissimo (ed ancor oggi chi sa per quanta parte inesplorato) alle ricerche scientifiche ed alle applicazioni tecniche, un esercito innumerevole di studiosi e di inventori se n'è impadronito, l'ha coltivato e lo coltiva con ardore talvolta febbrile e con instancabile tenacia, traendone sempre nuovi frutti, fra cui più d'uno di pregio insperato. La gran massa di lavoro, a cui devesi questo continuo progresso, è anonima; ma, come sempre, gl'impulsi decisivi sono effetto di opera individuale.

Per tratteggiare lo sviluppo compiuto dalla radiotecnica durante il suo trentennio di vita, conviene innanzi tutto distinguere nei suoi vari aspetti il problema delle radiocomunicazioni. Ora poichè, come si è visto, l'irradiazione dell'energia, ossia il distacco di essa dall'oscillatore trasmittente e, reciprocamente, la captazione dell'energia da parte del sistema ricevente, sono tanto più agevoli, quanto più breve è il periodo, la radiotecnica è essenzialmente tecnica delle frequenze, che si sogliono chiamare altissime, in confronto con quelle usuali della elettrotecnica. Esse sono comprese oggi all'incirca fra 15.000 e 30.000.000 periodi al secondo.

Il primo aspetto da considerare è perciò quello, che riguarda sia la produzione di correnti alternative di così alta frequenza o, come suol dirsi, di correnti oscillatorie, sia la manipolazione o la modulazione di tali correnti, effettuate in modo acconcio per ottenere che siano affidati ad esse i segnali telegrafici o telefonici. Il secondo aspetto o momento riguarda l'irradiazione o emissione dell'energia, ossia il passaggio di essa dalla forma di energia vincolata ad un circuito di corrente oscillatoria, alla forma di energia propagantesi per mezzo di onde alla superficie della terra e nell'atmosfera. Il terzo momento riguarda appunto tale propagazione fra la stazione trasmittente e la ricevente. Il quarto ed il quinto momento, che completano la catena dei fenomeni da esaminare, sono reciproci rispetto al secondo ed al primo e consistono l'uno nella captazione dell'energia, ossia nella trasformazione da energia di onde a energia di corrente oscillatoria, l'altro nella trasformazione di quest'ultima in un segnale telegrafico o telefonico, utilizzabile per la registrazione o per l'audizione. I cinque momenti si possono quindi denominare, attribuendo alle parole il senso ora detto: *generazione, emissione, propagazione, captazione, ricezione* (1).

La generazione e la ricezione, con la varietà innumerevole dei procedimenti e degli apparecchi ideati per effettuarle, abbracciano la più vasta mole di nozioni inerenti alla radiotecnica. L'emissione e la captazione riguardano sopra tutto la tecnica delle antenne. La propagazione delle onde, che è il fenomeno fondamentale di ogni radiotrasmissione, non potendo essere dall'uomo direttamente governata e neppure per ora esattamente seguita, non dà luogo per conto proprio ad un ramo della tecnica, ma influisce in modo decisivo sugli altri, perchè delle conoscenze sulla propagazione si trae profitto da un lato nello studio della forma e delle conseguenti proprietà che conviene dare alle antenne, dall'altro nella scelta delle frequenze da adoperare.

A proposito della definizione quantitativa di queste ultime, giova rilevare subito, che nella tecnica si è usata spesso a preferenza l'indicazione della lunghezza d'onda nel vuoto, in luogo di quella della frequenza. Queste due grandezze sono notoriamente legate l'una all'altra dal fatto, che il loro prodotto è eguale alla velocità della luce nel vuoto ($2{,}998 \cdot 10^{10}$ cm./ sec.). Sembra tuttavia consigliabile preferire usualmente l'indicazione della frequenza a quella della lunghezza d'onda.

II.

I GENERATORI DI OSCILLAZIONI.

8. - *I generatori di oscillazioni smorzate.*

La *generazione* di correnti oscillatorie è una diretta trasformazione di energia meccanica in energia di corrente ad alta frequenza, ovvero una trasformazione (che si suole anche chiamare *conversione*) di energia elettrica di corrente continua, ovvero di corrente alternata a più bassa frequenza, in energia di corrente oscillatoria.

Durante la prima fase di sviluppo della radiotecnica, come già nelle esperienze del Hertz e dei suoi continuatori, la produzione delle correnti oscillatorie fu ottenuta mediante il fenomeno ben noto della scarica periodica del condensatore. Un circuito com-

(1) Si preferisce qui (in base all'uso e specialmente in base alla funzione degli apparecchi, che si chiamano comunemente *ricevitori*) la parola *ricezione* all'altra *rivelazione*, sebbene letteralmente la prima potrebbe meglio essere usata a rappresentare ad un tempo la captazione e la rivelazione.

Digitized by Google

prendente capacità, autoinduzione e, inevitabilmente, resistenza, chiuso su sè stesso (contatto *a* della fig. 2) col condensatore carico, diventa sede, se la resistenza è inferiore ad un limite critico, di oscillazioni elet-

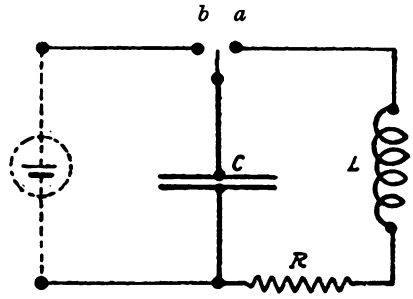


Fig. 2.

triche, la cui frequenza è essenzialmente definita dal valore del prodotto della capacità per l'induttanza. Con tale procedimento è agevole ottenere tutte le frequenze della radiotecnica, ma, poichè durante l'oscillazione il circuito è abbandonato a sè stesso e non riceve somministrazione di energia, l'oscillazione è necessariamente smorzata, il fenomeno tende a spegnersi e, per rinnovarne il ciclo, occorre ricaricare il condensatore (contatto *b* della fig. 2) attraverso un circuito di alimentazione. Questo, nei primi tempi della radiotecnica conteneva il secondario di un rocchetto d'induzione, cui furono poi sostituiti un trasformatore a circuito magnetico chiuso, eccitato con corrente alternativa di frequenza musicale, o, assai raramente, una sorgente di f.e.m. continua ad alta tensione.

L'organo forse più importante e caratteristico della stazione trasmettente a oscillazioni smorzate è il commutatore, che deve permettere il successivo alternarsi della fase di carica con quella di scarica del condensatore. Poichè si tratta di regola di tensioni

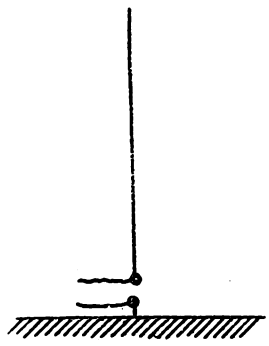


Fig. 3.

elevate, la chiusura del circuito oscillatorio avviene attraverso una scarica disruptiva, senza che gli elettrodi siano portati metallicamente a contatto; e l'organo chiamasi scaricatore. La forma più antica è quella del semplice spinterometro a sfere, introdotto nel circuito di antenna, che è anche esso un circuito oscillatorio (fig. 3). Un'altra forma, relativamente più moderna, è quella dello scaricatore rotante (figura 4); ma ancor più perfetto apparisce lo scaricatore ad impulso. Esso si trova infatti in quasi tutte le stazioni a oscillazioni smorzate, che ancora sopravvivono di fronte all'uso sempre più esteso delle oscillazioni continue.

Il concetto dell'*eccitazione ad impulso* è legato a quello dell'uso di circuiti accoppiati, ossia dell'introduzione dello scaricatore non già nel circuito di antenna (fig. 3), sibbene in un circuito di trascurabile potere irradiante, accoppiato più o meno immediatamente col circuito di antenna (fig. 4). Ora, se

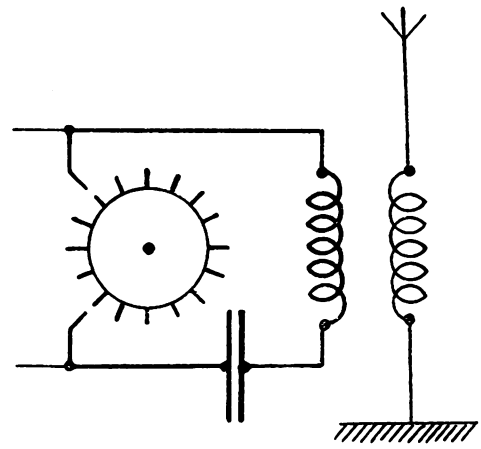


Fig. 4.

da un lato si esegue in modo convenientemente stretto tale accoppiamento e dall'altro si provvede a disionizzare prontamente lo spazio, in cui è avvenuta la scarica, così da accrescere di molto e con grandissima rapidità la sua resistenza elettrica (ciò che si ottiene di solito frazionando lo spazio fra un certo numero di spinterometri con distanze esplosive minime e con elettrodi metallici di estensione notevole), si può ottenere che l'oscillazione nel circuito primario sia energicamente smorzata o addirittura ridotta ad un semplice impulso unidirezionale. Ciò agevola il trasferimento quasi integrale dell'energia dal primario, in cui fu accumulata sotto forma di energia di carica del condensatore, al secondario, in cui essa dà luogo ad un'oscillazione smorzata non più soggetta alle perdite, che la presenza di uno scaricatore introduce sempre nei circuiti.

9. - *La generazione di oscillazioni continue.*

Le oscillazioni smorzate vanno sempre più perdendo terreno nel campo della radiotecnica di fronte alle oscillazioni continue. Queste si verificano, quando l'afflusso di energia al circuito oscillatorio principale avviene in tal modo, che l'oscillazione si ripeta con andamento invariato di periodo in periodo, od almeno con variazioni relativamente così ristrette, da avvicinarsi il più possibile al fenomeno armonico semplice, senza smorzamento alcuno. I vantaggi delle oscillazioni continue sono molteplici e di importanza relativa diversa a seconda dei casi: migliore utilizzazione degli apparati a pari cimento dei materiali, ossia con eguale coefficiente di sicurezza, possibilità di minori di-

Digitized by Google

sturbi reciproci fra diverse trasmissioni, ricezione assai più efficiente per mezzo dei sistemi a battimenti, più elevato rendimento di generazione e così via. Pregio particolarissimo, quello di prestarsi a far da supporto, attraverso i procedimenti di modulazione, alle trasmissioni radiotelefoniche.

I tentativi di adattare la scarica smorzata del condensatore alla produzione di oscillazioni quasi continue non ebbero alcun successo, perchè nel frattempo si affermavano nuovi procedimenti di generazione di tutt'altro tipo. Ai quali si giunse per diverse vie. Da un lato quella dei generatori elettromeccanici sincroni, aiutati eventualmente dai moltiplicatori di frequenza, dall'altro quella dei convertitori asincroni o, se si vuole, dei sistemi a resistenza negativa: l'arco e il triodo.

10. - *I generatori sincroni.*

I generatori elettromeccanici sono in certa guisa l'estensione, verso il campo delle alte frequenze, dei procedimenti di costruzione in uso per gli alternatori ordinari. Le difficoltà tecniche, che si incontrano per questa via, diventano tanto più ardue, quanto più elevata è la frequenza che si vuol produrre: basta pensare al legame di questa con la velocità periferica e con il passo polare. Occorre perciò abbandonare la costruzione ordinaria a poli alternati salienti e ricorrere ai tipi detti a ferro rotante, già noti anch'essi nell'elettrotecnica, cercando di adattarli costruttivamente alla produzione di alte frequenze. I problemi da risolvere sono essenzialmente meccanici.

Il cammino per raggiungere la meta può essere agevolato, se si rinuncia a produrre direttamente con l'alternatore la frequenza che si desidera e ci si arresta ad un sottomultiplo di essa, affidando ai moltiplicatori di frequenza il compito di elevarla poi al suo valore definitivo. Questi apparecchi utilizzano la variabile permeabilità del ferro per provocare in determinati circuiti la comparsa di un certo numero di armoniche della frequenza fondamentale. Una di tali armoniche può essere opportunamente esaltata, filtrata e adoperata per la radiotrasmissione. Quanto più elevato è l'ordine dell'armonica, tanto più disuniforme è l'afflusso di energia al circuito oscillatorio, poichè esso si ripete con un ritmo, che è legato alla frequenza fondamentale (1). Ci si riavvicina per questa via ad un sistema generatore di oscillazioni smorzate, che ricevono ritmicamente nuovi impulsi ad intervalli di tempo più lunghi, che non il periodo proprio dell'oscillazione. La moltiplicazione della frequenza può anche farsi con bassi rapporti di moltiplicazione, ma in più stadi successivi. Il più semplice schema di principio del moltiplicatore magnetico è quello in fig. 5, che meglio si adatta alla produzione di armoniche dispari, laddove le armoniche pari si ottengono più agevolmente deformando il ciclo magnetico con l'aiuto di un campo prodotto da corrente continua.

(1) G. V.: *Convertitori statici di corrente elettrica. L'Elettrotecnica*, 25 marzo 1926, vol. XIII, N. 9, pag. 182 e seguenti, § 23.

Un altro procedimento di moltiplicazione della frequenza, che può essere effettuato in più stadi, ma secondo moltiplicatori che crescono solo in progressione aritmetica, è quello, che utilizza la possibilità di ottenere, mediante circuiti stazionari percorsi da correnti alternate, campi rotanti con velocità angolare legata alla frequenza delle correnti. Considerato il caso di macchine bipolari e indicata con f la velocità massima (in giri al secondo), che per ragioni meccaniche non si deve superare, si può partire da frequenza zero (corrente continua) e ottenere da una prima macchina corrente di frequenza f. Generando con questa un campo rotante in senso inverso al rotore, si può avere da una seconda macchina la corrente di frequenza $2f$, e da questa con una terza la frequenza $3f$ e così via. Le diverse macchine possono anche essere fuse in una sola. Questo principio di moltiplicazione, per addizione successiva di una frequenza base, si dimostrò nella pratica assai meno vantaggioso, che l'altro della generazione diretta o della moltiplicazione statica in base ai fenomeni di permeabilità variabile; e fu abbandonato.

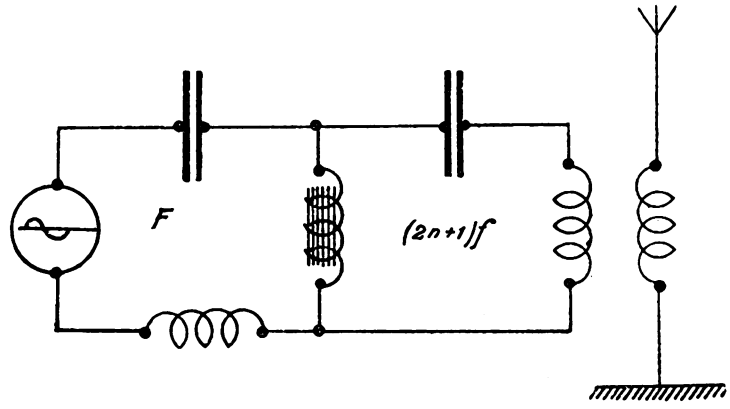


Fig. 5.

I sistemi, di cui si è fatto cenno, si dicono sincroni, perchè la frequenza generata dipende rigidamente dalla velocità di rotazione di un alternatore. Ma non per questo mancano in essi i circuiti oscillatori costituiti di induttanza e capacità, poichè alle alte frequenze, se si vogliono mettere in giuoco potenze considerevoli, è sempre indispensabile portare i circuiti a funzionare nelle condizioni prossime alla risonanza ed in particolare compensare mediante condensatori la reattanza induttiva dei generatori e dei moltiplicatori. Ma è la frequenza del generatore, e non la costante di oscillazione del circuito, quella che imprime il suo ritmo al fenomeno periodico.

11. - *I generatori asincroni.*

Nei generatori o convertitori asincroni il fenomeno può essere per contro rappresentato, come quello del comportamento di un circuito oscillatorio, che vibra con la sua frequenza propria ed in cui è inserito un particolare elemento, capace di rifornire l'energia consumata durante ogni periodo. Questo elemento compensa dunque tutte le azioni dissipative, che tenderebbero a spegnere progressivamente l'oscillazione;

Digitized by Google

e, poichè queste possono essere assimilate ad una resistenza ohmica, l'elemento attivatore può a sua volta assimilarsi ad una resistenza ohmica negativa, che conviene inserire, a seconda dei casi, in serie o in derivazione o con inserzione mista o indiretta nel circuito oscillatorio. L'artificio di ricorrere al concetto di resistenza negativa non può essere evidentemente disgiunto dalla considerazione, che, là dove agisce una resistenza negativa, avviene nel circuito oscillatorio una introduzione di energia elettrica, prelevata da un altro circuito.

Esempio tipico è quello dell'arco elettrico, alimentato con corrente continua. Esso presenta invero una resistenza positiva, ma così rapidamente decrescente al crescere della corrente, che le variazioni di tensione e quelle di corrente avvengono in senso opposto, ossia l'arco si comporta, rispetto a un circuito derivato contenente in serie un condensatore (e quindi atto ad essere percorso, a regime, soltanto da corrente alternata) come una resistenza negativa (fig. 6). Adattato dal *Poulsen* alla produzione delle

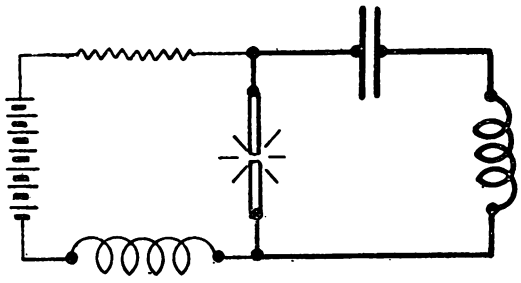


Fig. 6.

frequenze usate nella radiotecnica (ad esclusione delle più elevate), l'arco, dopo aver reso notevoli servigi, è oggi assai poco in favore, a cagione della sua non perfetta stabilità, della insufficiente purezza delle oscillazioni prodotte e del moderato rendimento di conversione dell'energia.

Il generatore o convertitore asincrono, che soverchia oggi per importanza ogni altro apparecchio in uso nella radiotecnica, è il *triodo*, ideato dal *de Forest*. Esso rappresenta il tipo più comune dei così detti tubi elettronici ed è notoriamente fornito di un catodo incandescente, di un anodo metallico freddo e di un terzo elettrodo (griglia), interposto fra i due. Compito particolare della griglia è quello di governare, in funzione del potenziale che essa assume e per mezzo del campo elettrico che produce, il flusso di elettroni, che, sprigionandosi dal catodo incandescente, tende a dirigersi, nell'interno del tubo perfettamente vuoto, verso l'anodo. Il comportamento del triodo generatore, rispetto al circuito oscillatorio che esso alimenta, può essere interpretato come quello di una resistenza negativa, inserita in derivazione (1). Il funzionamento del generatore a triodo richiede infatti l'esistenza di un collegamento di reazione, che faccia variare il potenziale di griglia in dipendenza dall'oscillazione prodotta ed in modo tale da provocare opportune variazioni di corrente anodica, atte a rifornire di energia l'oscillazione stessa e ad annullarne lo smorzamento. La funzione esercitata dal triodo è in sostanza, come nel caso dell'arco, quella di convertire l'energia di corrente continua, ricevuta dal circuito di alimentazione, in energia di corrente alternata, fornita al circuito oscillatorio (fig. 7). Gli schemi di inserzione, secondo

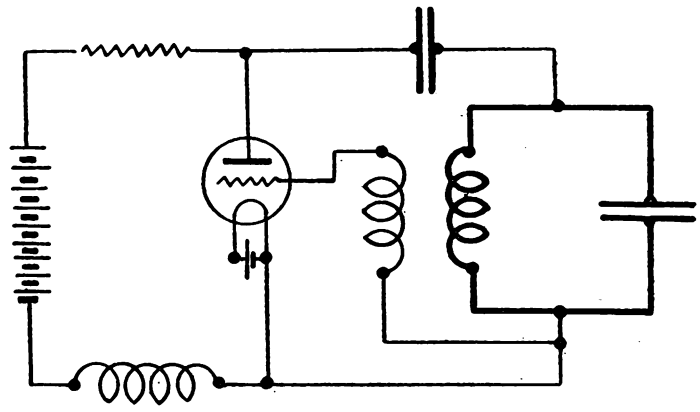


Fig. 7.

i quali può avvenire tale conversione di energia sono svariatissimi. In ciascuno di essi, quando si vuol conseguire un elevato rendimento di generazione, occorre regolare la reazione in modo, che l'afflusso di energia sia limitato ad un impulso relativamente breve in ciascun periodo, con che le oscillazioni prodotte non possono essere rigorosamente sinoidali.

Passato in seconda linea l'arco, il campo è dunque oggi tenuto, per ciò che riguarda la produzione di oscillazioni continue ad uso radiotecnico, dai generatori sincroni (alternatori), con o senza moltiplicatori di frequenza, e dai triodi. La diffusione dei primi è tuttavia assai limitata in confronto con quella dei secondi, perchè la generazione per via elettromeccanica si dimostra favorevole solo nel caso di potenze rilevanti e di frequenze moderate. Essa si trova infatti adoperata quasi esclusivamente nelle stazioni per servizio commerciale a medie e grandi distanze con apparati a onde lunghe. Tutte le altre applicazioni sono basate sull'uso dei triodi, e fra esse in particolar modo le comunicazioni mediante frequenze elevatissime (onde corte) e la radiotelefonia. Il triodo, comparso dapprima come apparato di piccolissima potenza per la ricezione e costruito di regola con bulbo di vetro, è divenuto ormai capace, negli esemplari più recenti, di convertire potenze dell'ordine delle diecine di kW, specialmente nei tipi, in cui la parete di vetro è parzialmente sostituita da una parete metallica, che costituisce l'anodo e può essere attivamente refrigerata. Non v'è dubbio, che nell'invenzione del triodo e degli altri tubi elettronici si deve riconoscere la causa prima della magnifica fase di sviluppo della radiotecnica, a cui oggi assistiamo.

12. - *Gli stabilizzatori di frequenza.*

Molti altri problemi tecnici, oltre quello del generatore o convertitore propriamente detto, sono connessi con il quesito della produzione delle oscil-

(1) loc. cit. nota (2) § 14.

Digitized by Google

lazioni. Uno di essi riguarda la costanza della frequenza generata, che è indispensabile per permettere l'uso efficace di circuiti selettivi e di apparecchi di alta sensibilità alla ricezione, e quindi anche per consentire la ricezione a grandi distanze e in mezzo a disturbi ed interferenze. Nel caso dei generatori sincroni, la frequenza dipende direttamente dalla velocità di rotazione dell'alternatore, ed il problema si riconduce a quello di un'accuratissima regolazione automatica (per via meccanica ed elettrica) di tale velocità su un valore costante. Nel caso degli apparati ad oscillazioni smorzate e di quelli, senza confronto oggi più importanti, ad oscillazioni continue generate da triodi, la frequenza dipende dalle costanti del circuito oscillatorio o del sistema di circuiti oscillatori, alimentato dal generatore. Accade di frequente, che le condizioni fisiche del circuito, specie per effetto della presenza dei triodi, subiscano leggere variazioni nel tempo, a cagione delle quali anche la frequenza non si mantiene rigorosamente costante. Si cerca di porre rimedio a tale inconveniente, affidando la funzione di battere il tempo, ossia di determinare la frequenza, ad un circuito oscillatore o risuonatore, costruito con speciali cure e sottratto per quanto possibile alle influenze perturbatrici; ovvero servendosi di un tale circuito ausiliario per correggere le variazioni di frequenza del generatore, appena queste accennino a determinarsi; ovvero infine adoperando nell'uno o nell'altro dei due modi ora accennati un oscillatore, in cui la frequenza propria sia definita non dal prodotto della capacità per l'induttanza inserite in un circuito elettrico, ma in base alle costanti di un'altra trasformazione alternativa di energia.

A questi requisiti ben soddisfano gli *oscillatori piezoelettrici*, capaci di trasformare reversibilmente oscillazioni meccaniche in elettriche e di vibrare elasticamente con frequenze proprie, che risultano rigidamente legate alle dimensioni geometriche dei saggi. Nella tecnica si usano a tal uopo frammenti opportunamente sagomati di cristalli di quarzo, collegati con un triodo generatore, di cui essi mantengono praticamente invariabile la frequenza. La proprietà dei piezooscillatori di individuare strettamente alcune frequenze, li rende preziosi anche per altre applicazioni ed in particolare per l'uso come campioni secondari di frequenze radio, con grande vantaggio del perfezionamento (sempre più necessario) dei metodi di misura e di verifica delle frequenze, usate nelle trasmissioni.

I cristalli piezoelettrici, fornendo il modo di trasformare energia di correnti oscillatorie in energia di vibrazioni meccaniche, hanno inoltre permesso di sviluppare una tecnica, che è estranea alle radiocomunicazioni, ma presenta molta affinità con esse, e consiste nell'uso delle vibrazioni elastiche, comunicate dal piezooscillatore al mezzo circostante, per l'emissione di segnali sottomarini a frequenza ultraudibile, che vengono ricevuti, in base al fenomeno inverso, per mezzo di un piezorisuonatore. Questi segnali, per effetto del fenomeno dell'eco, hanno trovato speciale applicazione nella misura delle profondità marine. In questo caso l'emissione e la captazione del segnale son fatte di solito dal medesimo apparecchio piezoelettrico.

Quando il convertitore a triodo non governa esso stesso la propria frequenza, ma la riceve da un altro generatore di potenza assai più piccola, non si ha più il funzionamento ad autoeccitazione (fig. 7), bensì quello ad eccitazione separata (fig. 8), che si suole

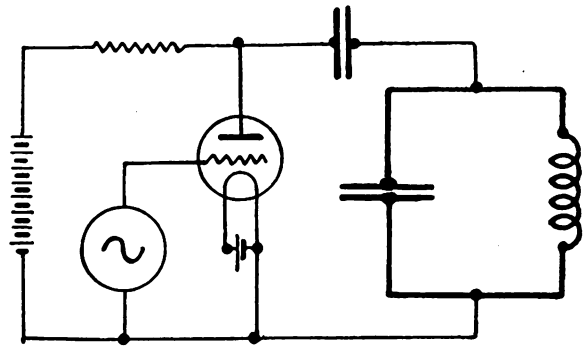


Fig. 8.

anche chiamare funzionamento del triodo come *amplificatore*. Una tale disposizione può essere ripetuta più volte, partendo da una potenza oscillatoria iniziale di una piccola frazione di watt e salendo, per amplificazioni successive, fino a diecine o centinaia di kilowatt. Il primo oscillatore a frequenza costante, anzichè elettromagnetico o piezoelettrico, può anche essere ad es. un elettrodiapason, di cui si utilizza poi e si amplifica una particolare armonica.

Poichè i triodi generatori richiedono che la tensione continua di alimentazione sia relativamente elevata (parecchie migliaia di Volt per gli apparati di potenza considerevole), si deve ricorrere o all'uso di speciali dinamo ad alta tensione, ovvero a quello di diodi raddrizzatori. L'azione di questi ultimi, che comprendono solo il catodo incandescente e l'anodo, si basa sulla loro conduttività unilaterale, ossia sul fatto che la corrente non può attraversare il vuoto elevatissimo, che regna entro il bulbo, se non come corrente elettronica emessa dal catodo. Uno dei vari schemi, usati per convertire corrente alternata in corrente continua ad alta tensione e per livellare quest'ultima così da attenuarne grandemente il carattere pulsativo, è riportato ad esempio dalla figura 9. In esso la sorgente di f.e.m. alternativa fornisce anche la corrente di accensione.

13. - *La manipolazione e la modulazione dei segnali.*

Infine, al problema generale della trasmissione si collega ancora quello della manipolazione e della modulazione dei segnali. Per affidare a un sistema di onde la trasmissione del pensiero, non si può lasciarlo fluire in modo uniforme e continuo, ma occorre agire in qualche modo sulle loro caratteristiche e principalmente sulla loro ampiezza o sulla loro frequenza. Nel caso dei segni di un alfabeto telegrafico si possono separare i segni stessi col sopprimere completamente l'oscillazione, ossia riducendo a zero l'ampiezza; ovvero si può manipolare provocando una variazione di frequenza, senza mutamento di ampiezza (ed in

Digitized by Google

questo caso ci si affida alla selettività del ricevitore per distinguere i segni dalle pause interposte); o si può infine far l'una cosa e l'altra.

Nel caso della radiotelefonia occorre invece effettuare la modulazione. Questa ha per iscopo di far variare, in modo rispondente alla voce od al suono

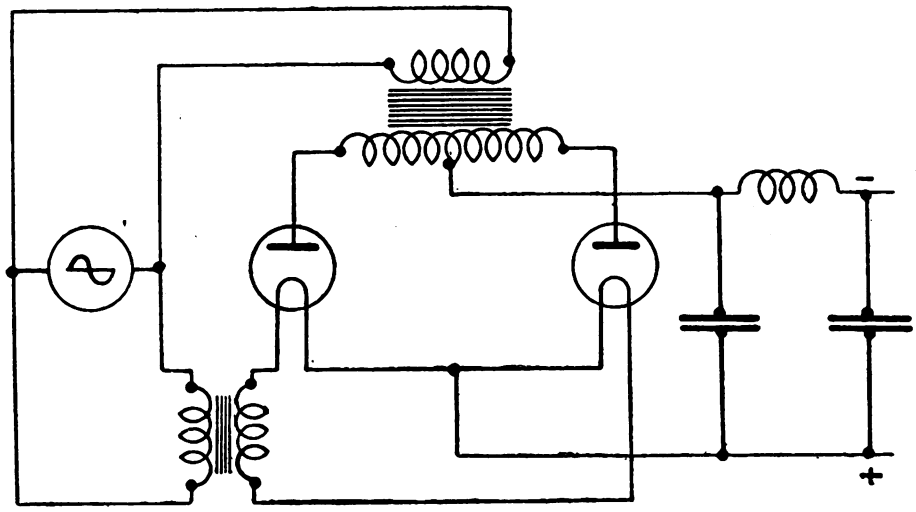


Fig. 9.

da trasmettere, l'ampiezza o la frequenza della oscillazione, che fa in certo modo da supporto o da veicolo al segnale. Variazioni di frequenza e variazioni di ampiezza non sono essenzialmente distinte: in particolare una grandezza periodica di elevata pulsazione ω, che passi per lo zero a intervalli perfettamente costanti e corrispondenti ad ω, ma di cui si faccia variare armonicamente l'ampiezza con pulsazione più lenta ω', non è più in realtà soltanto una grandezza armonica di pulsazione ω, ma è la somma di questa e di altre due di pulsazione $\omega \pm \omega'$. Il fenomeno è più complesso, se la modulazione non avviene con legge armonica. Se si tien conto della gamma di pulsazioni ω', che occorre trasmettere per riprodurre il suono (e non si può tacere, che lo sviluppo della radiotelefonia e quello, simultaneo e non meno interessante, della telefonia a grandi distanze su fili e per cavi, hanno dato un nuovo magnifico impulso agli studi di acustica, relativi alla composizione e alle proprietà della voce e dei suoni in genere), si vede che una comunicazione telefonica portata da onde ad alta pulsazione ω (siano esse libere come nelle radiocomunicazioni ordinarie, siano esse guidate da linee elettriche) presenta uno spettro, esteso ad un certo intervallo a destra e a sinistra di ω.

Per diminuire, a pari intensità di ricezione, la potenza messa in giuoco, per attenuare le distorsioni di suono dovute a interferenze fra le varie armoniche, e per limitare la zona di frequenze impegnata da ciascuna trasmissione, si può modulare una oscillazione di debole potenza, poi filtrarla in modo da arrestare la fondamentale e tutta la parte di spettro che si trova da un lato di essa, ed infine amplificare ed irradiare solo l'altra. Nell'apparato di ricezione occorre in tal caso aggiungere di nuovo, all'oscillazione raccolta, la oscillazione fondamentale di pulsazione ω, affinchè il segnale riesca intelligibile.

Alla stessa guisa anche un segnale telegrafico, manipolato a una certa velocità di trasmissione, sia per mezzo di variazione parziale o totale di ampiezza, sia per mezzo di variazione di frequenza, dà luogo a una somma di oscillazioni che determinano un certo spettro nella scala delle frequenze. L'energia irradiata è tanto meno raccolta intorno alla frequenza originaria dell'oscillatore, quanto più rapida è la manipolazione e quanto più bassa è quella frequenza. Per quest'ultimo motivo le altissime frequenze (onde corte) si prestano assai meglio all'uso di manipolazioni rapidissime, ossia ad una utilizzazione sempre più vantaggiosa dei collegamenti radio, che non le frequenze più basse (onde lunghe).

I particolari tecnici dei metodi di manipolazione e di modulazione sono molto svariati; con essi si può oggi raggiungere in telefonia una grande perfezione nella riproduzione della voce e dei suoni (influenzata del resto assai più dalla fedeltà dei microfoni e dei telefoni, che non dalla parte esclusivamente elettrica del dispositivo), ed in telegrafia una velocità di trasmissione, che può spingersi a parecchie centinaia di lettere al minuto primo.

III.

I RICEVITORI DI RADIOSEGNALI.

14. - *La ricezione dei radiosegnali.*

Analoga e reciproca alla trasmissione è la ricezione dei radiosegnali, intesa come trasformazione della debole corrente oscillatoria, generata nell'antenna ricevente dal passaggio delle onde, in un effetto, che permetta di registrare o di ascoltare i segnali stessi. Quella corrente oscillatoria è per la sua natura inadatta e per la sua potenza insufficiente a produrre immediatamente l'effetto desiderato. Occorre dunque

Digitized by Google

trasformare la corrente oscillatoria (azione rivelatrice) e utilizzarla a liberare e governare energia, disponibile in posto (azione amplificatrice o di relais). A queste due funzioni se ne aggiunge una terza, anch'essa di grande importanza, che è quella di filtrare il segnale utile, in modo da dare ad esso il massimo rilievo possibile in confronto con gli altri segnali e con le perturbazioni elettromagnetiche di diversa origine, raccolte dall'antenna (azione selettiva). L'ordine, con cui si susseguono queste azioni nel passaggio del segnale dall'antenna all'organo registratore o di audizione, non è sempre il medesimo e le azioni stesse possono essere intercalate fra loro e ripetersi in stadi diversi.

15. - *La selezione delle oscillazioni.*

La selezione o filtrazione è basata essenzialmente sui fenomeni di risonanza, ossia sugli effetti, che si possono ottenere combinando nei circuiti le capacità e le autoinduzioni in modo da farne dipendere il comportamento, rispetto alle correnti alternative, dalla frequenza di queste ultime. Il circuito oscillatorio semplice, costituito da una capacità e da una induttanza in serie, presenta infatti un'impedenza, che è minima per una particolare frequenza, e va crescendo, quando ci si allontana da essa, tanto più rapidamente, quanto più piccola è le resistenza ohmica, ossia quanto più piccole sono le perdite. Analogamente un circuito composto di due rami in parallelo, l'uno contenente capacità, l'altro autoinduzione, presenta nel suo insieme, fra gli estremi comuni, una impedenza, che è massima per un valore critico di frequenza (circuito di arresto) e diminuisce all'allontanarsi della frequenza da quel valore. Lo studio dell'accoppiamento di più circuiti risonanti (fig. 10)

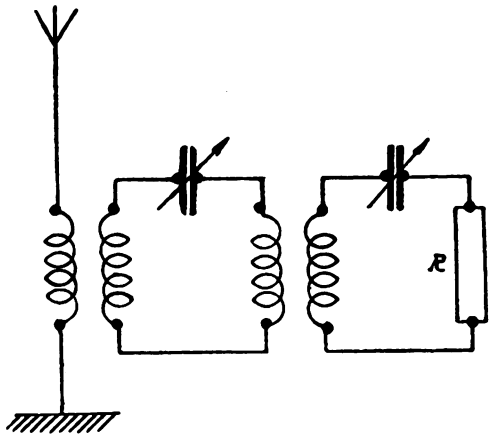


Fig. 10.

dimostra la possibilità di esaltare, entro certi limiti, l'azione selettiva ottenuta in tal modo, mentre l'introduzione di circuiti di arresto può eliminare speciali interferenze su frequenze determinate.

Ma non sempre, come si è visto, interessa favorire una sola particolare frequenza. Altre volte (ad es. nella telefonia, nella telegrafia con onde lunghe e con forte velocità di manipolazione, ecc.) si vuole bensì filtrare il segnale, ma si desidera a tal fine di lasciare il passo non ad una frequenza privilegiata, ma ad un certo intervallo di frequenze. Ciò si può ottenere con altre combinazioni, basate anch'esse su fenomeni di risonanza, di cui l'esempio più comune è quello dei circuiti in catena, costituiti da maglie

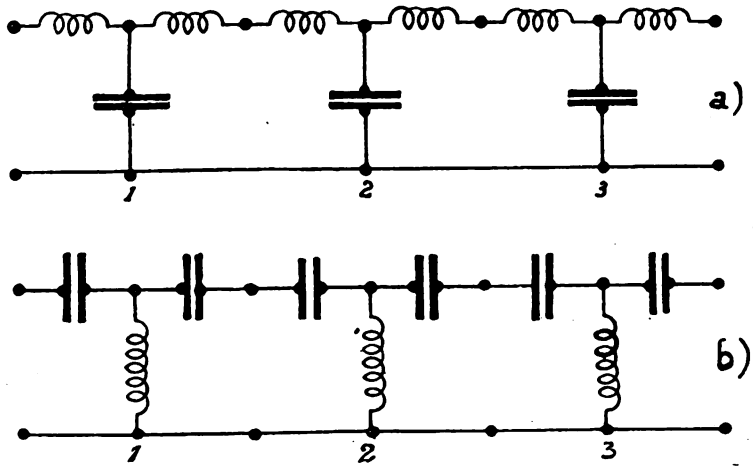


Fig. 11.

successive per es. del tipo della fig. 11*a* o 11*b*. La catena del primo tipo è adatta ad ostacolare le frequenze superiori ad un certo valore critico, quella del secondo esercita analoga azione sulle frequenze inferiori ad un altro valore critico. La combinazione dei due principi può dare un filtro, che ammetta un solo intervallo di frequenze.

I concetti accennati sull'azione selettiva possono essere applicati sia alle correnti di alta frequenza, sia a quelle di frequenze acustiche, che si incontrano nelle fasi successive della trasformazione, a cui il segnale è soggetto nell'apparato ricevente. Nello studio dei circuiti selettivi non si deve inoltre perdere di vista l'effetto della manipolazione o della modulazione, le quali tolgono, come si è visto, anche al segnale emesso da un oscillatore a frequenza costante, le sue proprietà di emissione, per dir così, monocromatica; e danno luogo alla presenza di altre frequenze più o meno prossime a quella dell'oscillatore. Di ciò si può anche tener conto, nel caso della telegrafia, in un altro modo, in sostanza equivalente, che consiste nel considerare il sistema selettivo non a regime con corrente oscillatoria continua, ma nella fase transitoria, durante la quale (per effetto della manipolazione) la corrente oscillatoria deve stabilirsi e spegnersi alternativamente. Per ambedue le vie si giunge alla conclusione, che al di là di un certo limite è illusorio il vantaggio che, nel senso di una selezione sempre più perfetta, può ottenersi moltiplicando il numero degli elementi risonanti o filtranti; vantaggio che si potrebbe invece elevare illimitatamente (intercalando opportuni processi di amplificazione per compensare le perdite di energia), se l'oscillazione fosse perfettamente continua ed a regime.

L'effetto di selezione o di filtrazione del segnale utile, in confronto con altri segnali e con i così detti disturbi atmosferici, può essere ricercato anche per

Digitized by Google

altra via, cioè mediante dispositivi limitatori dei disturbi più forti (in cui si trae spesso partito degli effetti di saturazione, che si verificano in tutti i tubi a emissione elettronica) ed anche mediante dispositivi differenziali o di opposizione (in cui si utilizzano le differenti caratteristiche del segnale utile e dell'intruso, per ottenere un'azione risultante, in cui l'effetto del secondo tenda a neutralizzarsi automaticamente e quello del primo sia per nulla od in molto minor misura attenuato).

Un'altra via per cercare l'indipendenza della ricezione dai disturbi, è quella di ripetere automaticamente e con grande rapidità un ristretto numero di volte la stessa lettera e di utilizzare il fatto, che è estremamente improbabile che i disturbi la deformino ogni volta nello stesso modo.

16. - *L'amplificazione delle oscillazioni.*

L'azione amplificatrice si esercita prevalentemente con l'aiuto dei triodi. Lo schema di principio è quello della fig. 8. Esso si applica sia alle oscillazioni ad alta frequenza, quali sono raccolte dall'antenna ricevente, sia a variazioni di frequenza più bassa, quali si utilizzano negli stadi successivi di trasformazione del segnale. Il processo di amplificazione può essere ripetuto più volte (ed eventualmente alternato con processi di filtrazione) per mezzo di una serie di triodi. Il collegamento fra di essi, ossia il passaggio dell'energia da uno stadio di amplificazione al successivo, può avvenire in molte guise, in base a schemi fondamentali di accoppiamento per resistenza e capacità, ovvero per mutua induzione (fig. 12).

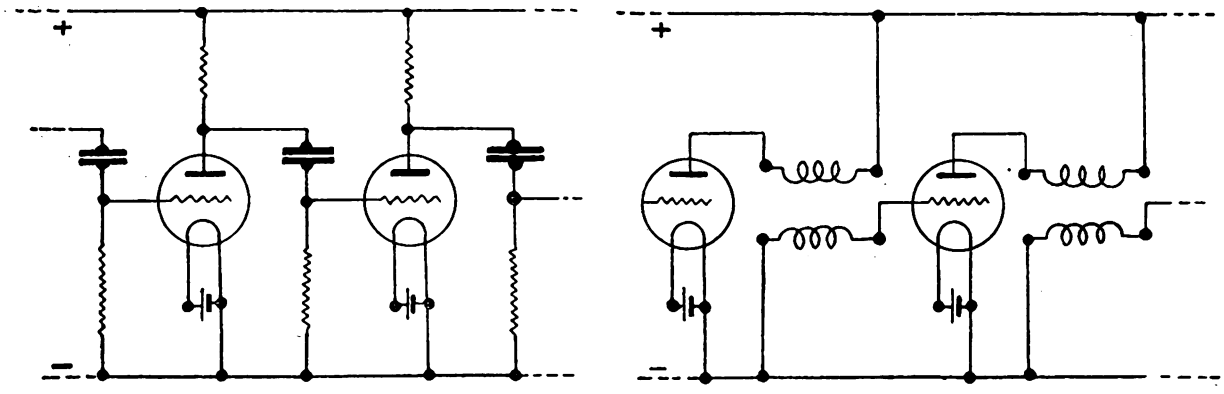


Fig. 12.

Non è facile ottenere, che gli accoppiamenti elettrostatici od elettromagnetici fra le varie parti di un amplificatore siano costituiti esclusivamente da quelli voluti e rispondenti allo scopo per cui si usa l'apparecchio. Le influenze reciproche parassite, che si determinano fra le varie parti, possono dar luogo al funzionamento del sistema come generatore di oscillazioni perturbatrici o ad altri inconvenienti. Esse si attenuano mediante l'uso di schermi, ovvero si compensano mediante altri accoppiamenti induttivi o capacitivi, disposti in modo da annullare quelli perturbatori. Le difficoltà sono specialmente gravi nel caso delle frequenze elevatissime (onde corte), così che spesso si rinuncia per tal motivo all'amplificazione ad altissima frequenza e si applicano i processi di magnificazione dopo una prima trasformazione del segnale. In alcuni casi è possibile affidare ad un medesimo triodo due azioni amplificatrici distinte, ossia far ripassare attraverso di esso il segnale in due successive fasi della sua trasformazione.

A seconda degli usi, interessa più o meno la rigorosa fedeltà dell'amplificazione; tale esigenza è specialmente delicata per l'amplificazione delle correnti a frequenza udibile, utilizzate nella radiotelefonia, e richiede particolari e accurati artifici.

17. - *Il raddrizzamento o rivelazione delle oscillazioni.*

I processi di trasformazione (azione rivelatrice) non sono separati nettamente da quelli di amplificazione, perchè assai spesso, mentre si trasforma il segnale, gli si fornisce in pari tempo energia locale. Ciò accade ad es. tutte le volte che l'oscillazione esercita un'azione di relais, come si verificava tipicamente nel primo rivelatore usato dalla radiotecnica, il coesore a limatura: l'oscillazione, accrescendo bruscamente la conduttività del coesore, apre la via ad una corrente continua locale, che non si interrompe se non si provvede a distruggere lo stato determinatosi nel coesore. In luogo di una diretta azione di relais da parte delle oscillazioni, si effettua oggi in prevalenza una trasformazione di corrente oscillatoria in corrente a più bassa frequenza per effetto di raddrizzamento. Già il diodo (fig. 9) esercita funzione tipicamente raddrizzatrice e ad esso può assimilarsi il contatto puntiforme fra due elettrodi metallici (di cui uno eventualmente cristallino). Ambedue questi dispositivi sono anche amplificatori, se vengono, come suol dirsi, sensibilizzati mediante una sorgente locale di f.e.m. continua; ma la funzione di raddrizzamento ed insieme di amplificazione viene oggi effettuata assai più agevolmente per mezzo dei triodi, utilizzando la curvatura delle loro caratteristiche (1).

L'inserzione in circuito di un elemento, di cui la resistenza varia, in funzione della corrente, in modo

(1) loc. cit. nota (2), § 16.

Digitized by Google

dissimmetrico rispetto alla condizione media, tende a far comparire nel circuito stesso una componente di corrente raddrizzata. Questa componente è continua, se l'oscillazione prima del raddrizzamento è di ampiezza costante, è invece di intensità variabile, se anche l'ampiezza non è costante. Quando ogni segno dell'alfabeto telegrafico è trasmesso per mezzo di una successione di oscillazioni smorzate, come avviene nelle stazioni a scintilla, la componente raddrizzata nel ricevitore è pulsativa e la sua frequenza coincide con quella delle scariche del trasmettitore. Se tale frequenza è stabile e rientra nell'intervallo delle frequenze musicali, la corrente ottenuta per raddrizzamento contiene a sua volta una componente alternativa a frequenza musicale, che permette di ripetere su di essa i processi di amplificazione e di filtrazione, e consente la ricezione a udito e la buona utilizzazione delle facoltà selettive dell'orecchio umano.

18. - *L'eterodina, i dispositivi a reazione, la registrazione dei segnali.*

Nella ricezione dei segnali emessi su onde continue si ha, per semplice raddrizzamento, una corrente di ampiezza costante, che si può rendere udibile al telefono, facendola diventare discontinua con l'aiuto di un rapido interruttore. Ma si preferisce di solito fruire in tutto od in parte dei vantaggi ora accennati delle frequenze acustiche, evitando di raddrizzare direttamente la corrente oscillatoria in una corrente continua, e trasformandola invece dapprima in un'altra corrente alternativa, di frequenza più bassa che quella originaria. A tal fine giova l'applicazione del principio detto dell'eterodina, ossia la sovrapposizione (addizione) alla corrente oscillatoria di pulsazione ω, di un'altra corrente oscillatoria locale di pulsazione ω_1, non molto diversa da ω. Si determina il noto fenomeno dei battimenti, per cui l'oscillazione risultante (reciprocamente a quanto si è detto di sopra) si può considerare come costituita, nel caso più semplice in cui le due ampiezze siano eguali, da una sola oscillazione di pulsazione intermedia $\frac{\omega + \omega_1}{2}$, di cui l'ampiezza vada variando periodicamente con pulsazione $\left[\frac{\omega - \omega_1}{2}\right]$. Il fenomeno è alquanto più complesso, quando le due ampiezze componenti non sono eguali; ma in ogni caso, dopo il raddrizzamento, si ha una corrente periodica, di cui la pulsazione fondamentale è $[\omega - \omega_1]$. Graduando opportunamente l'ampiezza della oscillazione locale, si può ricercare la condizione di massimo effetto come intensità, e variandone la pulsazione ω_1, si può regolare a piacere la frequenza dell'oscillazione ottenuta per raddrizzamento. Se quest'ultima è una frequenza udibile, il sistema è adatto solo per la radiotelegrafia e permette la ricezione a udito. Se per contro la frequenza dei battimenti è ultraudibile, il sistema può essere usato anche in radiotelefonia e presenta il vantaggio di agevolare l'amplificazione e la filtrazione dei segnali, operando su una frequenza meno elevata che quella dei segnali e regolabile a piacere mediante la frequenza dell'oscillatore locale.

Il sistema dei battimenti può anche essere utilizzato più volte in una medesima ricezione per abbassare ad es. in due salti successivi la frequenza del segnale fino a quella acustica. Data l'attitudine dei triodi ad agire sia come amplificatori, sia come raddrizzatori, sia come generatori, le varie funzioni possono anche essere simultaneamente affidate ad un medesimo triodo. In particolare il funzionamento a reazione (regolato in modo da esser prossimo alla condizione critica, per cui il triodo può innescare esso stesso oscillazioni locali, passando a funzionare come generatore) viene usato per ridurre quasi a zero la resistenza equivalente totale del circuito oscillatorio, collegato col triodo, così da renderlo un circuito risonante oltremodo selettivo.

Se poi la condizione critica per l'innescarsi della oscillazione è appena appena raggiunta, e non permanentemente, ma ritmicamente per brevi istanti, il sistema può essere regolato in modo, che l'oscillazione locale non si inneschi da sola, ma che basti la presenza di una oscillazione in arrivo, anche debolissima, per determinarne l'innescamento. L'oscillazione si ripete allora ad intervalli col ritmo (che può essere di frequenza acustica), con cui il sistema è posto nella condizione critica. Su questo concetto, detto della super-reazione, si basa un sistema di ricezione, anch'esso assai efficiente, specie per le frequenze più alte.

Nel caso della telegrafia, anche se si passa, come avviene il più delle volte, attraverso una frequenza musicale con l'aiuto dell'eterodina, occorre poi raddrizzare ancora la frequenza acustica, quando si voglia azionare non già un telefono per la ricezione a udito, sibbene un apparato scrivente (o addirittura un apparato perforatore, che azioni a sua volta una macchina stampante). La ricezione scritta è del resto l'unica possibile quando la bontà del collegamento permette di svolgere il traffico radiotelegrafico a velocità di trasmissione superiori a quella (per es. 150 lettere al minuto), per cui la ricezione a udito non è più possibile.

IV.

LE ANTENNE RADIOTELEGRAFICHE.

19. - *L'emissione e la captazione di energia elettromagnetica.*

Come la trasmissione e la ricezione, così anche l'emissione e la captazione delle onde elettromagnetiche costituiscono due aspetti o momenti del processo di una radiocomunicazione, che sono fra loro corrispondenti ed in certa guisa simmetrici.

Si è detto della proprietà, che possiede ogni elemento di circuito elettrico (in quanto è capace di creare campo elettrico e campo magnetico, ossia in quanto possiede capacità e autoinduzione) di irradiare energia, quando è percorso da una corrente alternativa. Questa attitudine ad irradiare è tanto più manifesta, quanto più elevata è la frequenza della corrente oscillatoria. Ad essa fa riscontro la proprietà reciproca del conduttore di diventar sede di f.e.m.

Digitized by Google

alternativa, quando esso è investito dalle onde elettromagnetiche. Tale proprietà si può considerare sia come effetto dell'azione del campo elettrico, che provoca movimento di masse elettriche nel conduttore, sia come effetto della variazione del campo magnetico, che fa nascere nel conduttore medesimo una f.e.m. d'induzione. Com'è naturale, si giunge per ambedue le vie al medesimo risultato, il quale rappresenta (da solo, senza bisogno cioè di esser duplicato) l'effetto complessivo dell'onda sul conduttore, da essa investito.

La forma più semplice di oscillatore irradiante e captante è quella lineare simmetrica, con o senza capacità concentrata terminale (fig. 13). L'oscillazione

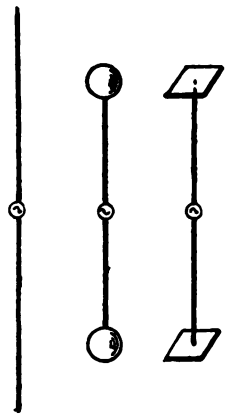


Fig. 13.

prende in esso la forma, a regime, di un sistema di onde stazionarie con nodi e con ventri di corrente e di tensione. Il sistema lineare, a differenza dei circuiti per cui si ammette, che la capacità e la induttanza siano concentrate in parti distinte, è suscettibile di entrare in risonanza non per una sola frequenza, ma per innumerevoli frequenze fra loro distinte. L'organo, che eccita le correnti oscillatorie nel sistema irradiante, o che ne rivela la presenza nel sistema captante, può essere inserito ad es. nel punto di mezzo dell'oscillatore. La teoria dell'oscillatore, quale fu data dal Hertz, permette di calcolare la potenza irradiata dal sistema, in funzione delle sue dimensioni e della intensità e della frequenza della corrente che lo percorre, e la potenza captata, in funzione delle dimensioni stesse e della intensità e della frequenza della componente del campo elettrico nella direzione del conduttore (ovvero del campo magnetico in direzione normale).

20. - *L'antenna e la presa di terra.*

L'idea geniale del Marconi di collegare l'oscillatore con la terra, e di creare così quella che si chiamò l'*antenna*, fu, come si è accennato, uno dei più notevoli elementi di successo della radiotelegrafia nella sua prima fase. Se la terra si può considerare come piana e perfettamente conduttrice, il collegare l'antenna colla terra equivale a creare in tutto lo spazio sovrastante al suolo un campo elettromagnetico, quale sarebbe prodotto nello spazio libero da un oscillatore costituito dall'antenna e dalla sua imagine virtuale, riflessa dal suolo stesso, agente a guisa di specchio. Si può quindi applicare all'antenna trasmittente e alla ricevente la teoria hertziana della irradiazione e della captazione, e dedurne la definizione di una « resistenza di radiazione » o resistenza utile, che è proporzionale al quadrato della frequenza ed al quadrato di una « altezza di radiazione », dipendente a sua volta dall'altezza geometrica del punto più alto e da altri elementi geometrici e fisici dell'antenna. La resistenza di radiazione individua l'attitudine dell'antenna a irradiare ed a captare energia.

L'ipotesi, secondo la quale la terra sarebbe imaginata piana e perfettamente conduttrice, non è evidentemente rigorosa. In particolare si verifica, che il sistema di correnti, che si svolgono nel suolo nella regione prossima all'antenna, dà luogo ad un insieme di perdite non trascurabile; di esso si suol tener conto mediante la così detta resistenza della presa di terra, che costituisce la parte preponderante delle resistenze passive. Il rapporto fra la resistenza utile (di radiazione) e l'insieme di tutte le resistenze del circuito irradiante, definisce il rendimento di emissione dell'antenna, che, nel caso delle onde medie e lunghe, ossia delle frequenze non altissime, ha di solito un valore assai modesto. Se ne deduce l'importanza di ogni artificio, che miri a ridurre la resistenza della presa di terra.

Giova allo scopo effettuare il contatto col suolo mediante un reticolato di conduttori immersi in esso, esteso anche al di fuori e tutto all'ingiro della proiezione del padiglione aereo dell'antenna. Giova poi ancor più addurre la corrente, mediante linee isolate, a più punti distinti di cotesto reticolato, governando opportunamente, con f.e.m. ausiliarie, la distribuzione della corrente fra le varie prese, o derivando queste separatamente dalle parti di antenna ad esse sovrastanti. Od anche si può ottenere notevole beneficio, sopprimendo addirittura la presa di terra e sostituendola col collegamento ad un reticolato metallico, sospeso ad una certa altezza dal suolo ed isolato da esso (contrappeso o schermo di terra). A questo medesimo dispositivo si può giungere concettualmente, considerandolo come un semplice oscillatore del Hertz, se pure non simmetrico; ma occorre tener presente, che, se il contrappeso non è a grande distanza dal suolo, quest'ultimo esercita egualmente (pur non dando più luogo ad una parte notevole delle perdite specifiche provocate dalla presa di terra) la sua più o meno perfetta funzione di specchio elettrico, ed influenza così la distribuzione del campo elettromagnetico irradiato. Il sistema del contrappeso è largamente usato negli impianti terrestri, specie in quelli a onde corte; esso è poi indispensabile nel caso degli aeromobili, in cui l'oscillatore può talvolta anche esser costituito da due metà simmetriche.

21. - *Le proprietà direttive delle antenne.*

Fino a che l'antenna ha un asse di simmetria verticale, come nelle forme semplici derivate dagli oscil-

Digitized by Google

latori della fig. 13 o nelle così dette antenne ad ombrello o simili, l'irradiazione avviene anch'essa in modo simmetrico (a parte gli eventuali effetti di disuniformità del suolo) rispetto a tutti i settori dell'orizzonte, ossia il sistema ha un piano di radiazione massima e un asse di radiazione nulla. Ma, quando tale condizione non è soddisfatta, l'irradiazione non può più esser simmetrica rispetto ad un asse e l'antenna presenta proprietà direttive, sia riguardo all'emissione, sia riguardo alla captazione. Già fin da quando (per accrescere le dimensioni ed in ispecie la capacità delle antenne trasmittenti, in modo da renderle adatte ad irradiare potenze considerevoli su frequenze sempre più basse, ossia sulle onde lunghe) si costruirono fra le altre le così dette antenne a gomito, fu possibile constatare che il diagramma di irradiazione tutto all'ingiro dell'antenna non è affatto un cerchio, ma ha una forma del tipo indicato in figura 14 (1). E prima ancora, ossia fin dal tempo delle

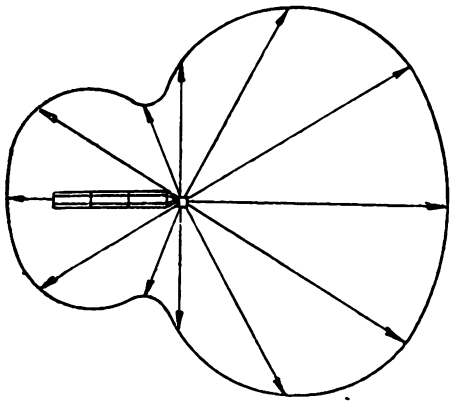


Fig 14.

esperienze del Hertz, chiarita l'identità di natura fra le oscillazioni elettromagnetiche e quelle luminose, si era pensato, specialmente per opera del Righi, a constatare anche per le prime i fenomeni di riflessione e di rifrazione, già noti per le seconde. Da ciò l'uso di specchi, costituiti da lamine conduttrici o da sistemi di fili di dimensioni e di orientamento convenienti, allo scopo di limitare l'irradiazione entro angoli solidi ristretti.

Uno dei dispositivi più semplici di irradiazione orientata può essere quello della fig. 15, in cui l'oscillatore è posto nell'asse focale di un segmento di cilindro retto a direttrice parabolica, che costituisce il riflettore. L'oscillatore vibra ad es. sulla sua fondamentale, ossia è sede di un'onda stazionaria di lunghezza doppia della lunghezza del conduttore. Lo specchio è costituito da un certo numero di conduttori di egual lunghezza (accordati coll'oscillatore), i quali entrano in vibrazione come risuonatori e producono un'irradiazione secondaria, che, sovrapponendosi a quella principale, tende a concentrare l'energia emessa in direzione parallela all'asse della parabola direttice.

(1) G. V.: *Misure di radiazione sugli aerei r. t.*, *L'Elettrotecnica*, 5-15 aprile 1921, vol. VIII, N. 10-11, pag. 213, figura 12 e Pubblicazione N. 11 dell'Istituto E. e R. T. della R. Marina.

Innumerevoli altri dispositivi si possono imaginare per raggiungere il medesimo scopo, utilizzando vari tratti di circuiti radianti; e questi possono anche es-

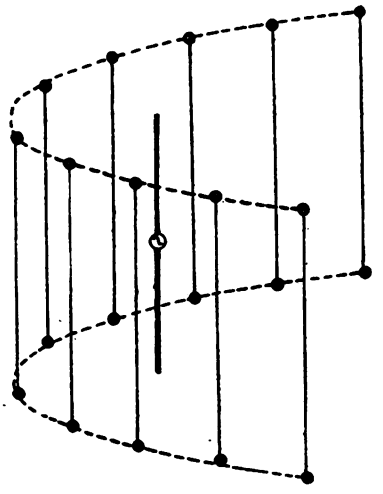


Fig. 15.

sere eccitati direttamente, anzichè indirettamente da un oscillatore principale, come nel caso ora esaminato.

Esempi tipici (che si possono derivare come casi limite da quello del sistema parabolico) sono quelli di un sistema di oscillatori paralleli, posti a determinati intervalli su di un medesimo piano. Se gli oscillatori sono alimentati in modo, che le oscillazioni avvengano in tutti con la medesima fase, è evidente, che l'irradiazione risulta massima in direzione normale al loro piano. Se poi si dispone di un numero conveniente di oscillatori opportunamente distanziati, si può ottenere non solo che la radiazione nella direzione del piano sia nulla, ma anche che essa sia ridottissima in tutte le altre direzioni, all'infuori di quella privilegiata. Di quest'ultima si può infine utilizzare un solo senso (1), eliminando la radiazione nell'altro ad es. mediante un sistema di risuonatori, posti in un piano parallelo al primo a distanza conveniente (fig. 16).

L'altro caso limite si ha utilizzando la stessa disposizione degli oscillatori in un unico piano, ma eccitandoli in modo, che la differenza di fase fra le oscillazioni entro due di essi corrisponda esattamente al tempo impiegato dall'onda a percorrere la loro distanza. In tal modo la direzione privilegiata è quella del piano degli oscillatori e, con un numero ed una disposizione conveniente di essi, si può anche qui facilmente avere un fascio assai ristretto e limitato ad un solo verso. Da queste disposizioni si possono poi far discendere altre più complicate, in cui gli oscillatori sono disposti in più piani e così via.

Fino a che si suppone di usare oscillatori, che vibrano sulla loro fondamentale, l'irradiazione di energia è massima nel piano equatoriale del sistema (ossia nel piano orizzontale, se l'oscillatore è verticale e collegato alla terra) e va man mano decrescendo

(1) È questo il dispositivo usato di preferenza nelle così dette « stazioni a fascio » della Compagnia Marconi.

Digitized by Google

(col quadrato del coseno della latitudine), quanto più ci si allontana da esso. I dispositivi a radiazione orientata o direttiva dei tipi accennati mirano quindi a limitarla ad uno spicchio sferico. Ma, quando l'oscillatore vibra su una delle sue frequenze di risonanza più elevate della fondamentale, ossia quando l'oscil-

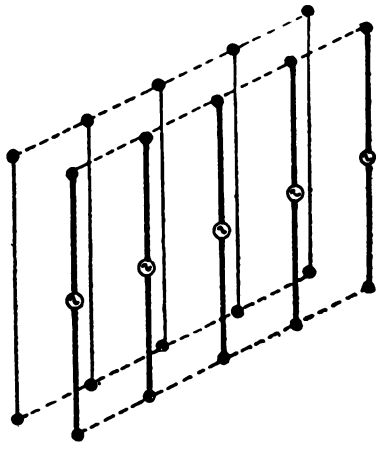


Fig. 16.

latore comprende un numero di semionde stazionarie superiore ad 1, il modo di variare della radiazione in funzione della latitudine (misurata sempre rispetto al piano equatoriale dell'oscillatore) diviene più complesso; ed è possibile effettuare una concentrazione di energia emessa secondo determinate inclinazioni rispetto all'orizzonte, ossia restringere la radiazione intorno ad una inclinazione privilegiata. Si può anche concepire la combinazione di ambedue i processi di radiazione orientata, che potrebbero forse rispettivamente chiamarsi azimutale e zenitale (se si imagina di far giacere nel piano orizzontale l'equatore del dipolo irradiante).

22. - *L'antenna ricevente a telaio.*

Le antenne od i sistemi di antenne, che presentano proprietà direttive all'emissione, le presentano analogamente alla captazione dell'energia. Per quest'ultima funzione viene usata altresì un'altra comunissima forma di antenna direttiva, che è quella detta a telaio od a quadro (fig. 17) e si può imagi-

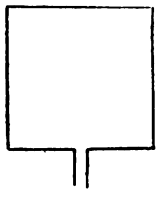


Fig. 17.

nare derivata dal risuonatore di forma circolare, usato dal Hertz. L'antenna a telaio può essere costituita da più spire e può avere gli estremi liberi o collegati alle armature di un condensatore di sintonia od anche esser fatta funzionare fuori di una condizione di risonanza.

Se le dimensioni del telaio sono piccole rispetto alla lunghezza d'onda, e se si può ammettere, che la corrente oscillatoria abbia la medesima fase in ogni sezione del conduttore, si vede facilmente, che l'irradiazione di ciascuna coppia di elementi opposti del perimetro si annulla in direzione normale al piano della spira, si compensa invece solo in parte nelle direzioni giacenti nel piano stesso, secondo le quali si ha l'irradiazione (o la captazione) massima. È agevole mettere in rilievo l'analogia di questo oscillatore (che si potrebbe chiamare magnetico, perchè fa vibrare il campo magnetico nella direzione assiale della spira) con quello lineare (fig. 13) hertziano (che si potrebbe chiamare elettrico, perchè in esso è il campo elettrico che vibra lungo l'asse di figura), poichè ambedue presentano radiazione massima in un piano (che si può chiamare equatoriale), nulla lungo un asse (che si può chiamare polare).

Mediante mutamenti elettrici di intensità e di fase delle correnti messe in giuoco, ovvero mediante mutamenti di posizione dei circuiti, si possono mutare le direzioni di radiazione e di captazione privilegiate e servirsene per irradiare onde in direzioni variabili a piacere o per individuare la direzione da cui proviene l'onda captata (radiogoniometri). Le forme più semplici di circuiti orientabili sono quelle dell'oscillatore lineare (elettrico) e del telaio (oscillatore magnetico), che possono poi essere variamente combinate fra loro, per ottenere proprietà direttive più complesse.

La radiazione orientata (all'emissione) richiede di solito dispositivi con oscillatori multipli, che riescono di effettuazione tanto più difficile, ingombrante e costosa, quanto più bassa è la frequenza, su cui si vuol operare. Tali dispositivi non sono quindi praticamente applicabili, se non al caso delle frequenze più alte (onde corte). Nella ricezione, poichè, data l'efficienza dei processi di amplificazione, non v'è necessità che il valore della potenza captata sia rilevante, si può usare con profitto anche per le onde lunghe, la captazione orientata, specialmente con l'aiuto di una o più antenne a telaio o con dispositivi equivalenti.

23. - *L'uso delle radiazioni direttive.*

I vantaggi, che si hanno di mira nell'effettuare l'emissione direttiva, sono principalmente quelli: di raggiungere, a pari distanza da superare, un'economia nella potenza adoperata, di rendere possibile un maggior numero di comunicazioni simultanee senza reciproco disturbo e di consentire una parziale segretezza delle comunicazioni. Alla captazione direttiva si chiede: di agevolare l'esclusione dei segnali estranei e degli effetti di altre perturbazioni elettromagnetiche, di accrescere a pari intensità di campo elettromagnetico l'efficacia dell'azione captante e quindi di permettere anche per questo motivo un'economia della potenza di emissione (1).

(1) A parte ciò, nel caso dei radiofari a fascio ed in quello dei radiogoniometri, si persegue lo scopo specifico di fornire gli elementi per individuare la posizione di una stazione radio, montata ad es. su una nave o su un aeromobile, rispetto ad altre stazioni di riferimento.

Digitized by Google

La misura, secondo cui tali vantaggi possono essere raggiunti nei vari casi, non è ancora completamente conosciuta. Nel caso della ricezione, le qualità selettive direzionali presuppongono, come condizione ideale, quella in cui le onde in arrivo siano polarizzate in un piano perpendicolare alla superficie terrestre e alla direzione di propagazione. Da tale condizione ci si discosta sempre nella realtà, ma ora più e ora meno ; e, mentre con altre forme di polarizzazione è ancora possibile utilizzare le proprietà direzionali dell'antenna ricevente, si riscontra talvolta che le onde in arrivo non consentono affatto tale vantaggio, comportandosi come onde di diffusione.

Sul fatto che, anche se le onde conservano la proprietà di essere polarizzate in un piano, questo deve essere (per effetto delle perdite di energia, che si verificano nel suolo, al passaggio delle onde al di sopra di esso) non perpendicolare, ma inclinato in avanti (nel senso della propagazione dell'energia) rispetto alla superficie della terra, si basa un tipo di antenna ricevente direzionale, detto « a onde », costituito da un lungo conduttore sospeso orizzontalmente a non grande distanza dal suolo nella direzione di propagazione. Esso ha appunto lo scopo di utilizzare quella componente orizzontale del campo elettrico dell'onda, che nasce per effetto dell'inclinazione del piano di polarizzazione rispetto all'orizzonte. L'uso di antenne riceventi orizzontali si dimostra talvolta conveniente anche per altri scopi. Ad ogni modo, se pure per la imperfetta polarizzazione delle onde in arrivo, gli effetti direzionali non sempre sono netti e decisamente proficui, conviene tuttavia in molti casi, dato l'onere non grande che i necessari dispositivi comportano, cercare di trarne vantaggio per la ricezione (1).

Per contro non è ancora certo, che vi sia indiscutibile vantaggio ad usare l'emissione orientata. È dubbio infatti, che i diagrammi di radiazione fortemente direttiva nel piano orizzontale, quali si misurano a piccole distanze dall'antenna trasmittente, siano validi anche a grandi distanze e non risultino per contro assai modificati da una diffrazione in senso orizzontale provocata dalla presenza della terra. Dati quantitativi sicuramente accertati su questo punto non si hanno ancora a disposizione. Sembra ad ogni modo, che il vantaggio di una segretezza assoluta, al di fuori di un certo settore, non sia raggiungibile e che il confronto fra le stazioni trasmittenti a radiazione azimutale concentrata e quelle a radiazione azimutale uniforme, debba essere basato prevalentemente su fattori economici, ponendo sulla bilancia da un lato una economia nel consumo di energia, dall'altro gli oneri derivanti da una maggiore spesa di impianto e dalla più complicata struttura dell'installazione. Poichè sono oggi in esercizio parecchi collegamenti a onde corte a radiazione non guidata e d'altro canto si è inaugurato recentemente un collegamento Inghilterra-Canadà con stazioni a fascio, al quale seguiranno presto, a quanto si annuncia, altri collegamenti analoghi su distanze maggiori, l'esperienza non tarderà a fornire nuovi e forse decisivi elementi riguardo all'importante quesito.

(1) Recenti interessanti esperienze dimostrano ad es. la necessità di uno schermo o di altro dispositivo equivalente, che renda la ricezione unidirezionale, allo scopo di evitare la sovrapposizione nel ricevitore delle onde prodotte da un medesimo segnale, ma che giungono all'antenna ricevente secondo percorsi di diversa lunghezza alla superficie del globo e quindi spostate le une rispetto alle altre in modo tale da ingenerare confusione fra i segni.

V.

LA PROPAGAZIONE DELLE ONDE.

24. - *Le radiazioni alla superficie della terra.*

Il momento intermedio, o fase intermedia, del processo di una radiocomunicazione è rappresentato dalla propagazione delle onde dall'antenna trasmittente all'antenna ricevente. Questa fase sfugge alla diretta verifica sperimentale e non dà quindi luogo allo studio di un insieme di particolari tecnici. Tuttavia i fenomeni di propagazione, sebbene ancora per buona parte ignoti o mal noti, influiscono, come si è già detto, in modo affatto decisivo, se pure indiretto, su tutta la tecnica delle radiocomunicazioni.

Lo studio della propagazione delle onde, emesse da un oscillatore hertziano in uno spazio dielettrico uniforme, isotropo ed illimitato, non presenta difficoltà ; ma esso non ci fornisce elementi bastevoli per investigare la realtà dei fenomeni, che accompagnano le radiocomunicazioni, perchè questi sono grandemente influenzati dalla presenza della terra e dell'atmosfera.

Il fatto, che anche le radiazioni emesse da aeromobili hanno origine il più delle volte ad una distanza dal suolo relativamente piccola in confronto con le distanze, a cui si effettuano le radiocomunicazioni, ha per conseguenza, che di regola queste giungono all'antenna ricevente sotto la forma di onde, che lambiscono la superficie terrestre, ossia scorrono sopra di essa. E, poichè il suolo è un conduttore più o meno imperfetto, il passaggio dell'onda elettromagnetica al di sopra di esso deve necessariamente essere accompagnato dal passagio di un'onda di corrente nel suolo medesimo. Il fenomeno è sostanzialmente lo stesso di quello, che noi ci rappresentiamo interpretando secondo la teoria del Maxwell la propagazione dell'energia lungo le linee elettriche. Solo è mutata la forma del conduttore, che non è più filiforme, ma è per contro costituito da una sfera conduttrice, in cui (nel caso dell'antenna trasmittente con presa di terra) si immette corrente oscillatoria in un punto determinato.

Queste ed altre analoghe considerazioni hanno condotto a distinguere, nel fenomeno di propagazione, un'onda spaziale ed un'onda superficiale, ma non si deve dimenticare che esse sono fra loro intimamente legate. Il fatto poi, che il suolo non sia perfettamente conduttore, porta con sè: che il vettore di propagazione (vettore di Poynting) deve avere, come si è già detto, una componente diretta verso il basso, che la velocità di propagazione superficiale deve essere minore, sia pure di poco, di quella spaziale rettilinea e che l'onda deve essere soggetta ad attenuarsi più

Digitized by Google

energicamente di quanto sarebbe altrimenti previsto, a cagione di un fenomeno di assorbimento di energia da parte del suolo.

Per di più, l'effettuazione di radiocollegamenti a distanze di molte migliaia di kilometri, anche al di là del quadrante terrestre e fino a raggiungere gli antipodi, rende necessario di tener anche conto della curvatura della terra. Il fatto che l'energia, irradiata dall'antenna trasmittente in tutte le direzioni del suo emisfero zenitale, si pieghi, seguendo la curvatura della superficie del globo, anche al di sotto del piano dell'orizzonte, può, almeno in parte, essere attribuito al fenomeno della diffrazione. Ma questa spiegazione si dimostra quantitativamente del tutto inadeguata, perchè non appena l'arco di cerchio massimo terrestre, percorso dal segnale, si approssima alla lunghezza di un quadrante, l'intensità del campo elettromagnetico in arrivo, prevista in base alla diffrazione (nell'ipotesi più favorevole di terreno perfettamente conduttivo), risulta senza confronto più piccola di quella che si riscontra sperimentalmente.

25. - *L'influenza dell'atmosfera.*

Questo risultato, insieme con le innumerevoli e complesse variazioni, a cui una data radiocomunicazione è continuamente soggetta, pur restando invariato tutto ciò che riguarda le due stazioni terminali, induce a ritenere per fermo, che, oltre e forse più che la terra, l'atmosfera abbia decisiva influenza su tutto l'insieme dei fenomeni considerati. Il fatto fisico, che sembra dover essere preponderante nel determinare tale influenza, è costituito dalla ionizzazione dell'atmosfera stessa, la cui distribuzione è eminentemente mutevole ed instabile, ma la cui intensità va in media crescendo, per ragioni ben note, al crescere dell'altitudine. Essa conferisce allo spazio occupato dal gas una parziale conduttività elettrica e modifica con ciò i fenomeni di propagazione, previsti per un mezzo dielettrico perfettamente polarizzabile.

A parte il fatto, che il passaggio dell'onda nell'atmosfera parzialmente ionizzata dà luogo necessariamente a perdite di energia, l'effetto più importante è stato concepito da taluni come una vera e propria riflessione delle onde verso il basso, determinata da una ipotetica superficie di separazione fra uno strato inferiore non ionizzato ed uno superiore fortemente ionizzato (strato di Heaviside-Kennelly), da altri come una rifrazione graduale, anch'essa verso il basso, dovuta a ciò, che la ionizzazione determina un aumento nella velocità di fase della propagazione. In un modo o nell'altro si avrebbe per risultato una limitazione dell'energia irradiata ad uno strato sferico di spessore limitato, dell'ordine forse di un centinaio di kilometri. Questa deduzione, se può far parere utopistiche le speranze di comunicazioni con altri pianeti, contribuisce a spiegare la relativa facilità di quelle che si effettuano fra punti diversi del nostro.

26. - *Le onde lunghe.*

Il fatto, che l'assorbimento di energia da parte del suolo è tanto più energico quanto più alta è la frequenza, e l'altro, che le onde tanto più facilmente si piegherebbero a seguire e a contornare la terra sotto la cappa degli strati più esterni e più fortemente ionizzati dell'atmosfera, quanto più bassa è la frequenza, influirono su tutta l'evoluzione della radiotecnica fino a pochissimi anni or sono.

Man mano che si vollero superare distanze sempre più grandi, si riconobbe sperimentalmente (pur attraverso una grandissima varietà di effetti prodotti da influenze stagionali, diurne e accidentali di ogni specie) essere vantaggioso diminuire la frequenza, ossia accrescere la lunghezza d'onda. Si passò così dalle frequenze dell'ordine di 10^6 fino a quelle dell'ordine di $1{,}5.10^4$, proporzionando con leggi empiriche la lunghezza d'onda alla distanza, che si voleva superare. I constatati vantaggi nella propagazione venivano in tal guisa fatti prevalere su gli svantaggi evidenti nella irradiazione e nella captazione, le quali, come si disse, sono tanto più agevoli, quanto più elevata è la frequenza.

In base a questi criteri sorsero le grandi stazioni per i servizi transoceanici e transcontinentali del tipo detto ad onda lunga, in cui, per migliorare il rendimento di radiazione (sempre assai modesto), si fece ricorso all'uso di antenne di enormi dimensioni con prese di terra speciali e complesse, e, per irradiare potenze dell'ordine delle diecine di kilowatt, si installarono apparati generatori della potenza di molte centinaia o di qualche migliaio di kilowatt. Gli esemplari di codesto tipo di grandi stazioni a onda lunga, che entrano ora in servizio, potranno forse essere gli ultimi.

27. - *Le onde corte.*

Un nuovo campo di ricerca scientifica e di applicazione tecnica si è aperto da circa un quinquennio con l'osservazione e lo studio delle proprietà delle così dette onde corte. Esso si è dimostrato improvvisamente fecondissimo e pieno di promesse. Già le esperienze del Hertz e dei suoi continuatori erano state effettuate con le frequenze, che oggi si usano nella nuovissima tecnica; ma, sia per le insormontabili difficoltà, che allora si opponevano alla produzione di oscillazioni continue di tale frequenza (difficoltà che solo recentemente e con l'aiuto dei triodi si sono superate), sia perchè, cominciando da trasmissioni a moderate distanze con frequenze già inferiori a 10^6 e tentando man mano di coprire distanze maggiori, si fu spinti dall'esperienza ad utilizzare frequenze sempre più basse, accadde che fino a pochi anni or sono la gamma di frequenze superiori a 10^6 fu considerata come priva di interesse pratico per le radiocomunicazioni ed abbandonata ai dilettanti. La osservazione dei pregi delle onde corte si può considerare casuale.

Anche in questo campo, la estrema varietà dei fatti sperimentali non consente, nonostante la grande massa di dati già raccolti, di tratteggiare in modo ben definito non solo un'armonica interpretazione dei risultati, ma neppure una sintesi obbiettiva di essi. Si può dire tuttavia che, oltrepassate le frequenze intorno a $1{,}5.10^6$, si è cominciato a rilevare un ap-

Digitized by Google

prezzabile vantaggio nelle trasmissioni notturne ed una radicale discordanza da quelle leggi empiriche, che, in base all'esperienza raccolta sulle onde più lunghe, si riteneva governassero il progressivo attenuarsi delle radiazioni, nel loro percorso lungo la superficie della terra.

Tale osservazione fa già nascere il dubbio, che il cammino dei segnali, affidati a queste onde, sia sostanzialmente diverso da quello seguito nel caso delle frequenze più basse. E la possibilità di questo sostanziale mutamento (anche se non si vuol dare importanza ad una condizione critica del modo di vibrare degli elettroni nell'atmosfera ionizzata sotto l'azione risultante del campo oscillatorio e del campo magnetico terrestre, condizione critica che cadrebbe appunto intorno ad una frequenza dell'ordine di $1{,}5 \cdot 10^6$) sembra confermata dal comportamento dei segnali emessi su onde sempre più corte. Accade infatti, che al di là di frequenze dell'ordine di $6 \cdot 10^6$, studiando l'udibilità dei segnali in funzione della distanza (e prescindendo quindi da tutte le altre numerose e svariate influenze), si constata dapprima un progressivo e rapido affievolirsi di essi fino a scomparire, ma poi, allontanandosi ulteriormente dalla stazione trasmittente e superato un intervallo più o meno lungo, in cui il segnale non è udibile, si riscontra che esso apparisce di nuovo e può essere utilmente ascoltato fino a distanze imprevedibilmente grandi.

28. - *La propagazione negli alti strati dell'atmosfera.*

Questo comportamento fa ritenere verosimile, che la trasmissione avvenga in genere, nel caso delle onde più corte, in base a due aspetti diversi e distinti del fenomeno di propagazione. Si avrebbe cioè una propagazione superficiale e legata alla crosta terrestre, che sarebbe governata dalle leggi, più o meno approssimate, dedotte dalle prove sulle onde più lunghe, e si attenuerebbe quindi assai rapidamente con la distanza. Ma in aggiunta a questa, si avrebbe anche una propagazione affidata alle radiazioni, che partono dall'antenna in direzione obliqua verso l'alto, e che, raggiunti gli strati ionizzati con un angolo conveniente, verrebbero ripiegate verso il basso e tornerebbero ad investire la terra.

Per mezzo della ulteriore elaborazione di questa ipotesi, si cercherebbe di spiegare il fatto che, fino a frequenze dell'ordine di $10\text{-}12 \cdot 10^6$, la trasmissione a grande distanza sembra avvenire meglio di notte che di giorno, laddove con frequenze ancor più elevate la trasmissione diurna sembra avvantaggiarsi progressivamente; e si cercherebbe altresì di interpretare la complessa influenza, esercitata sulla bontà del collegamento dalla posizione della zona del crepuscolo, rispetto alla traiettoria delle onde. Si sarebbe per di più indotti a considerare come inutilizzabili, agli scopi della trasmissione a grande distanza, le onde di frequenza superiore ad un certo limite (all'incirca dell'ordine di $30 \cdot 10^6$), perchè esse non potrebbero più essere rimandate verso il basso dagli strati ionizzati.

La storia recente della radiotecnica mostra tuttavia, come si debba essere guardinghi nel prestar fede ai risultati delle nostre ipotesi, le quali sono ancora assai incerte, essenzialmente perchè la portata di una stazione trasmittente, ovvero l'efficienza di un radiocollegamento, dipendono da un gran numero di cause, di cui noi scorgiamo solo l'effetto cumulativo e non riusciamo ancora a ben sceverare gli effetti singoli. Solo una raccolta abbondantissima di dati, rilevati con accuratezza, con metodo e con tutti i necessari elementi concomitanti, ed interpretata con acume, potrà permettere di formulare ipotesi più concrete.

Nel campo delle onde corte, la possibilità di irradiare e di captare energia secondo direzioni preferite offre un nuovo e prezioso mezzo per cercar di identificare la traiettoria, secondo cui l'energia stessa si propaga. E questo studio, oltre ad una importanza pratica per il perfezionamento delle radiocomunicazioni, presenta una notevole importanza scientifica, in quanto i fasci di onde che possiamo irradiare verso gli strati più alti dell'atmosfera e raccogliere nuovamente alla superficie della terra, sono uno dei pochi mezzi di cui disponiamo per investigare le proprietà di quegli strati e per progredire verso la soluzione di molti problemi di fisica terrestre.

Dal punto di vista tecnico l'uso delle onde corte si è largamente esteso nelle radiocomunicazioni di tutti i tipi e di tutte le portate. In particolare per le distanze grandi e grandissime, che si avvicinano al quadrante terrestre ed anche lo superano fino a raggiungere il semicerchio massimo, le trasmissioni a onde corte sono diventate dapprima un ausilio importante delle trasmissioni a onde lunghe, e poi, in qualche caso, le hanno sostituite completamente costituendo nuovi efficaci collegamenti. In questi il costo di impianto (specie se non si tratta di complicati sistemi per ottenere la radiazione orientata) e quello di esercizio (per effetto della grande riduzione di potenza totale, resa possibile specialmente dal molto cresciuto rendimento di radiazione) sono senza confronto minori che nei collegamenti a onde lunghe, mentre è in genere più facilmente raggiunta una maggiore velocità di manipolazione telegrafica.

29. - *I disturbi atmosferici.*

Un altro aspetto dell'influenza dell'atmosfera sulle radiocomunicazioni è rappresentato dal fatto, che la antenna della stazione ricevente non è influenzata soltanto dalle onde a cui sono affidate le radiotrasmissioni, ma raccoglie anche l'effetto di altre perturbazioni elettromagnetiche. La presenza di queste ultime riesce in molte circostanze grandemente molesta ed in qualche caso paralizza la possibilità di ricezione, mentre l'intensità propria del segnale sarebbe più che sufficiente ad assicurarla, ove non fossero presenti i disturbi. Si è già accennato agli artifici che si usano per attenuare gli effetti di tali disturbi. Essi si basano sull'uso di dispositivi differenziali e di limitazione, o di circuiti selettivi rispetto alla frequenza o rispetto alla direzione o di varie combinazioni degli uni e degli altri. Il rimedio non sempre è efficace, perchè: i metodi

Digitized by Google

differenziali o di limitazione non fanno che migliorare il rapporto fra l'intensità del segnale e quella del disturbo, ma non sopprimono quest'ultimo; la risonanza è solo parzialmente benefica, perchè il segnale, come si disse, è necessariamente manipolato o modulato e le corrispondenti oscillazioni elettriche non possono quindi identificarsi con un fenomeno armonico semplice a regime; ed infine l'uso della ricezione direttiva può esser di poco aiuto, se il disturbo o il segnale utile o ambedue giungono all'antenna ricevente sotto forma di perturbazioni diffuse, prive cioè delle caratteristiche proprie delle onde polarizzate.

Il problema è reso ancor più difficile dalla incertezza, che regna tuttavia sulla natura e sulla origine delle perturbazioni elettromagnetiche che, danno luogo ai disturbi. È dubbio se esse siano vere e proprie oscillazioni alternative o semplici impulsi aperiodici; sono oscure le cause, che le producono; ed è dubbio altresì se esse costituiscano fenomeni di grande portata, capaci di interessare vastissime zone, o se invece non abbiano un raggio d'azione ristretto. Molto probabilmente l'incertezza e le contraddizioni fra le ipotesi formulate al riguardo derivano anche qui dal fatto, che i fenomeni osservati sono l'effetto complessivo di cause agenti molteplici e diverse, ed anche qui solo indagini metodiche ed ingegnosamente predisposte (come talune già in corso da anni) potranno fornir materiali per un insieme di studi, che conduca a risultati concreti.

In particolare, riguardo alla frequenza, è accertato che in linea di massima i disturbi si fanno tanto più molesti, quanto più bassa è la frequenza, per cui è accordato il ricevitore, ciò che costituisce un altro notevole elemento a favore delle onde corte. Meno concordi sono invece i risultati riguardo al modo di variare (sempre molto notevole) del numero e della intensità dei disturbi in funzione delle ore del giorno, della stagione dell'anno, della latitudine geografica e così via; e neppure è stata finora formulata una classificazione ben definita e facilmente applicabile dei vari tipi di disturbi. Riguardo poi all'origine, si passa dalla ipotesi di un effetto di bombardamento dell'atmosfera da parte di materie cosmiche, entrate nel campo di attrazione della terra, a quella delle scariche temporalesche, ed a quella di influenze elettriche locali in vicinanza dell'antenna ricevente. La riprova della simultaneità di disturbi registrati in diverse stazioni sarebbe in favore dell'origine lontana, ma il materiale sperimentale non è ancora abbastanza ricco per decidere in modo sicuro, se ciò valga per ogni genere di disturbi; e d'altro lato si constata, che località anche fra di loro vicine sono spesso assai diversamente tormentate dagli atmosferici. Così pure sono ancora incerte, o per lo meno non possono essere generalizzate, le conclusioni riguardo alla eventuale provenienza dei disturbi da direzioni preferite, che, secondo taluni, sarebbero quelle dei massicci montagnosi ed in genere delle parti emerse del globo. È facile infine intuire quali legami possano sussistere fra lo studio dei disturbi atmosferici in relazione con le radiocomunicazioni e lo studio della meteorologia.

V.

IL PRESENTE ED IL PROSSIMO FUTURO DELLA RADIOTECNICA.

30. - *Le comunicazioni fra navi, aeromobili, stazioni fisse.*

Le radiocomunicazioni trovarono il loro primo importantissimo uso nel collegamento delle navi (e più tardi degli aeromobili) con la terra ferma e fra di loro. Il valore umanitario, commerciale, militare di tale collegamento, che solo le onde hertziane hanno potuto fino ad oggi effettuare in modo rispondente ad ogni pratica esigenza, è inestimabile. Ma, col perfezionarsi della tecnica, le radiocomunicazioni sono entrate in campo anche come mezzo di collegamento fra punti fissi, ponendosi in tal modo a fianco delle comunicazioni effettuate con l'aiuto di linee elettriche o di cavi. Molti collegamenti, che, per la distanza da coprire e per la natura e la poca intensità del servizio da svolgere, non sarebbe stato conveniente effettuare per altra via, han potuto essere utilmente stabiliti con il nuovo mezzo. Altri collegamenti sono stati invece allacciati accanto a collegamenti esistenti per fili o per cavi ed hanno saputo attrarre un volume di traffico non trascurabile. La tecnica di questi grandi impianti per servizio commerciale ha portato alla creazione di uffici centrali, da cui si manipolano simultaneamente più trasmettitori e si ricevono in pari tempo più segnali raccolti da altrettanti ricevitori. Vi si fa largo uso della manipolazione a macchina, della registrazione scritta dei segnali e, con l'una e con l'altra, della trasmissione ad alta velocità.

Un confronto di convenienza finanziaria fra le comunicazioni per cavi e quelle per radio non può essere fatto che caso per caso, mettendo a calcolo un gran numero di fattori, i quali sono soggetti essi stessi a continue variazioni non facilmente prevedibili. Basti dunque constatare a questo riguardo i risultati finora raggiunti con crescente vantaggio a favore delle radiocomunicazioni.

31. - *La Radiotelefonia.*

Nel campo della telefonia, le onde hertziane costituiscono il veicolo più appropriato che si potesse imaginare, per trasmettere simultaneamente discorsi, notizie ed esecuzioni musicali ad un grandissimo numero di ascoltatori, comunque disseminati sulla superficie del globo. La così detta radiodiffusione, la cui importanza sociale non può essere forse neppure oggi intieramente valutata, non sarebbe concepibile per altra via. E d'altro canto, anche nella telefonia propriamente detta, le onde hertziane sono oggi l'unico mezzo per attuare collegamenti transoceanici a distanza di parecchie migliaia di kilometri; di essi è tipico esempio il servizio pubblico recentemente inaugurato fra l'Inghilterra e gli Stati Uniti di America. Tale superiorità è dovuta, come è noto, al fatto che nei lunghissimi cavi sottomarini non riesce attuabile l'eliminazione

Digitized by Google

o la compensazione dei fenomeni, che operano nel senso di attenuare variamente e di distorcere le correnti telefoniche lungo il loro percorso.

32. - *La trasmissione delle imagini.*

Un'altra forma di comunicazione elettrica, in cui la radiotecnica già mostra di affermarsi molto vantaggiosamente, è quella che mira alla trasmissione delle imagini. Sono evidenti i servizi, che essa può rendere anche solo in confronto con la ordinaria trasmissione telegrafica, quando il tempo necessario a trasmettere, con sufficiente accuratezza, una determinata superficie di imagine, costituita dalla scrittura a mano od a macchina di un qualsiasi testo, risulti abbastanza breve. Ed è inutile soffermarsi sugli altri vantaggi della trasmissione di firme autografe, di disegni, di fotografie e simili.

Sono noti i problemi, che in questo caso debbono essere risolti. Il meccanismo della trasmissione consiste essenzialmente, secondo lo schema seguìto di solito: in un processo che si potrebbe chiamare di modulazione luminosa del segnale elettrico in partenza, a cui corrisponde in arrivo un processo reciproco di demodulazione, ed in un processo per mantenere, fra determinati organi delle due stazioni, il sincronismo necessario per fissare opportunamente le coordinate di ogni ricezione luminosa, rispetto all'insieme dell'immagine, che si vien trascrivendo. Si comprende, quanto sia vantaggioso affidare una trasmissione di questo genere ad un fenomeno periodico di altissima frequenza, che può permettere di inoltrare, distintamente e senza distorsione, un grandissimo numero di segni nell'unità di tempo, e di conseguire quindi ad es. una velocità di trasmissione della parola scritta, di gran lunga maggiore che quella ottenibile con i segni telegrafici, anche se manipolati con la massima rapidità. Ciò si risolve in una particolare attitudine delle radiocomunicazioni a questo nuovo uso, in confronto con le comunicazioni per filo. Vari sistemi si stanno rapidamente perfezionando in questo campo, che apparisce pieno di grandi promesse. Uno dei più noti utilizza per la modulazione luminosa la cellula fotoelettrica, per la demodulazione l'effetto di Kerr.

33. - *I radiogoniometri e le altre applicazioni.*

Un'altra speciale applicazione, di cui si è fatto cenno, e che ha già reso notevoli servizi alla navigazione marittima ed aerea e più ancora ne renderà certamente in futuro, è quella consistente nell'uso dei radiogoniometri e dei radiofari fissi o a fascio girevole. Oltre a tale uso, nel campo delle applicazioni prevalentemente militari, le radiotrasmissioni possono essere anche utilizzate allo scopo di azionare meccanismi installati in una stazione ricevente e non direttamente sorvegliati dall'uomo (radiocomando). E si può pensare altresì ad una effettiva trasmissione di energia per mezzo delle onde, sebbene, per questo scopo, la superiorità della trasmissione per fili, fin dove essa è possibile, apparisca per ora manifesta e del tutto soverchiante.

L'importanza della radiotecnica e la presumibile estensione dei suoi futuri sviluppi appariscono ancora maggiori, se si esaminano i rami collaterali di essa, che si intrecciano coi rami di altre scienze e delle loro applicazioni. Si è già accennato all'aiuto, che le oscillazioni elettriche possono recare sia allo studio delle proprietà fisiche degli alti strati dell'atmosfera e degli abissi del mare, sia a quello della meteorologia. Ma, anche restando nel campo dell'elettricità applicata, si può rilevare, che la teoria e la tecnica delle alte frequenze intervengono nella soluzione di numerosi e vitali problemi del tutto estranei alle radiocomunicazioni e riguardanti più specialmente le linee di trasmissione, i fenomeni di sopratensione ed in genere i regimi transitori negli impianti di trasporto di energia e nel relativo macchinario.

Infine fra la tecnica delle comunicazioni elettriche per fili e la radiotecnica i legami e gli aiuti reciproci appariscono sempre più numerosi e fecondi, come si rileva facilmente, se si pensa alle così dette trasmissioni ad onde convogliate (ossia eseguite per mezzo di correnti a frequenza radiotelegrafica, ma guidate da linee elettriche), alle trasmissioni telegrafiche multiple a frequenza musicale, all'applicazione sempre più estesa dei processi di filtrazione e di amplificazione e ad ogni altro ramo fra i più moderni della telegrafia e della telefonia.

Digitized by Google

Digitized by Google

INDICE

Pag.

Prefazione. - O. M. Corbino 7

L'opera scientifica di Alessandro Volta. - Prof. Luigi Volta 9

150 anni di elettrostatica. - Prof. Eligio Perucca 15

L'effetto Volta e la teoria elettronica della pila. - Prof. O. M. Corbino.... 37

La corrente elettrica e l'elettromagnetismo. - Prof. Ing. Ferdinando Lori 49

L'induzione elettromagnetica. - Prof. Ing. Luigi Lombardi 67

Calore ed elettricità. - Prof. Michele La Rosa..... 77

I conduttori variabili. - Prof. Alfredo Pochettino 87

La teoria del magnetismo. - Prof. Luigi Puccianti..... 99

Gli effetti elettro e magnetoottici e le loro interpretazioni. - Prof. Enrico Fermi..... 109

Fenomeni galvano e termo-magnetici nei metalli. - Prof. Enrico Persico.... 121

Sulle azioni magnetoelastiche. - Prof. Michele Cantone..... 139

Il passaggio dell'elettricità attraverso ai gas ionizzati. - Prof. Antonino Lo Surdo 151

Arco Voltaico e forno elettrico. - Prof. Alessandro Amerio 165

L'illuminazione elettrica. - Prof. Ing. Ugo Bordoni..... 183

Le nuove radiazioni. - Prof. Quirino Majorana 201

Elettrochimica, aspetti e problemi attuali dell'elettrolisi. - Prof. Livio Cambi 223

La misura delle grandezze elettriche. - Prof. Ing. Angelo Barbagelata.... 237

La produzione industriale della corrente elettrica. - Prof. Ing. Alberto Dina 249

Motori elettrici. - Prof. Riccardo Arnò 269

I grandi trasporti di energia. - Prof. Ing. Giuseppe Sartori 289

Radiocomunicazioni. - Prof. Ing. Giancarlo Vallauri 305

Digitized by Google

Il Direttore responsabile : Comm. Ing. CARLO BONOMI

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google